




# Análisis de las Antenas Microcinta para Cosecha de Energía Electromagnética Radiada

Zapata-Ochoa, Edison-Andres<sup>1</sup> ; López-Giraldo, Francisco-Eugenio<sup>2</sup> ; García-Pineda, Vanessa<sup>3,\*</sup> 

<sup>1,2,3</sup> Instituto Tecnológico Metropolitano, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Medellín, Colombia

**Resumen:** En este documento, se realiza una revisión de las antenas de microcinta utilizadas en sistemas de transferencia y captación de energía electromagnética radiada en las bandas de microondas, en función de sus parámetros técnicos y estructurales. Lo anterior permitirá identificar aspectos destacados en el empleo de las distintas configuraciones de antenas y sugerir líneas de investigación futuras que contribuyan con el desarrollo de esta área. Para ello, se realiza una revisión de literatura de artículos de investigación, trabajos presentados en conferencias y simposios, entre otros, que permitan conocer las diferentes propuestas existentes en torno al tema de estudio. Como resultado, se encuentra que existe una gran variedad de configuraciones y técnicas para el diseño de estas antenas, con los cuales se puede modificar el patrón de radiación y mejorar la ganancia. Se concluye entonces, que no existe un patrón definido de construcción para obtener la antena ideal. Sin embargo, se abre una perspectiva a la investigación para establecer y evaluar nuevas estructuras y materiales para la optimización de este tipo de antenas utilizadas en la recolección de energía de RF como otra alternativa para la carga de dispositivos de baja potencia y el desarrollo de la tecnología de internet de las cosas (IoT).

**Palabras clave:** Antenas de microcinta; ancho de banda; recolección de energía RF; arreglos de antenas; sensores de redes inalámbricas

## Analysis of Microstrip Antennas for Wireless Energy Harvesting

**Abstract:** This document reviews microstrip antennas used in wireless energy transfer and collection systems in microwave bands, based on their technical and structural parameters. The foregoing will allow the identification of outstanding aspects in the use of the different antenna configurations and suggest future lines of research that contribute to the development of this area. For this, a literature review of research articles, papers presented at conferences and symposiums, among others, is carried out which allows knowing the different existing proposals around the subject of study. As a result, it is found that there is a great variety of configurations and techniques for the design of these antennas, with which the radiation pattern can be modified, and the gain improved. It is concluded then that there is no defined construction pattern to obtain the ideal antenna. However, a research perspective is opened to establish and evaluate new structures and materials for the optimization of this type of antennas used in the collection of RF energy as another alternative for the charging of low power devices and the development of the internet of things (IoT) technology.

**Keywords:** Microstrip antenna; bandwidth; RF energy harvesting; array antenna; wireless sensors networks

### 1. INTRODUCCIÓN

Los dispositivos electrónicos autoalimentados han llamado la atención en los últimos años. Estos han sido estudiados en una amplia gama de aplicaciones entre los que se incluyen: redes de sensores inalámbricos, edificios inteligentes e Internet de las cosas (IoT) (Brown, 1996; Parthiban, 2020). Incluso, la industria automotriz la usa constantemente en la carga de vehículos eléctricos, también, es utilizada en electrodomésticos (Reyes-Vera et al., 2018) y en el campo biomédico.

La necesidad de implementar dispositivos de recolección de energía es cada vez mayor debido a los problemas que generan la carga, el reemplazo y el mantenimiento en sistemas convencionales que utilizan baterías como fuente de alimentación debido al desperdicio de energía que se genera en el proceso de conversión de carga de teléfonos móviles, tablets y otros componentes de detección y activación. Este problema puede ser resuelto mediante la recolección de energía electromagnética radiada existente en el ambiente (Miranda-Pantoja, 2002). En la Tabla 1, se presenta un resumen de fuentes alternativas de energía que podrían reemplazar las baterías convencionales.

\*vanessagarciap@itm.edu.co  
Recibido: 20/09/2023  
Aceptado: 28/03/2024  
Publicado en línea: 31/05/2024  
10.33333/tp.vol53n2.05  
CC 4.0

**Tabla 1.** Resumen de fuentes alternativas de energía para reemplazar baterías

Fuente	Densidad de potencia	Tecnología de cosecha	Ventajas	Desventajas
Solar	Interior: $10 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ Exterior: $10 \mu\text{w}/\text{cm}^2$	Fotovoltaica	Alta densidad de potencia	Exposición a la luz (no implantable) costoso
Vibración	Humano: $4 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ Industrial: $100 \mu\text{w}/\text{cm}^2$	Piezoeléctrico Electrostático Electromagnético	Implantable Alta eficiencia	Limitación física del material
Térmico	Humano: $4 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ Industrial: $1,1 \mu\text{w}/\text{cm}^2$	Termoeléctrico Piroeléctrico	Alta densidad de potencia implantable	Exceso de calor
RF	GSM: $0,1 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ WI – FI: $1 \mu\text{w}/\text{cm}^2$	Antena	Siempre disponible implantable	Baja densidad eficiencia proporcional a la distancia

Fuente: Tran et al. (2017)

La idea de la recolección de energía de RF se dio a conocer a principios de los 90, pero el concepto de convertir la energía de microondas en energía eléctrica fue iniciado por Nicola Tesla en 1901 (Brown, 1996). Debido a que la energía de RF junto a otras fuentes de energía alternativa depende del entorno, hacen que esta tecnología sea efectiva en aplicaciones críticas como monitoreo ambiental, atención médica, y defensa (Reyes-Vera et al., 2018).

Las antenas son elementos de vital importancia en los sistemas inalámbricos ya que determinan el rendimiento de dicho sistema. Existen varios tipos de antenas y su uso depende del rango de frecuencia de operación, tamaños, patrón de radiación, adaptabilidad a la aplicación, entre otros requerimientos (Choukiker et al., 2014; Miranda Pantoja, 2002). Para este caso, en el diseño de las antenas se emplean estructuras como antenas de microcinta o tipo parche, las cuales consisten en una tira metálica muy delgada colocada sobre un plano de tierra con un material dieléctrico en el medio. Estas antenas poseen un alto grado de adaptabilidad para operar en el rango de frecuencia de microondas (Mathur & Gupta, 2015).

Al utilizar estas técnicas de microcinta se obtienen antenas más compactas, de bajo costo, alto rendimiento y de fácil instalación, además por medio de fotograbado son integradas sin dificultad a placas de circuitos impresos (Printed Circuit Board, PCB) (García-Domínguez, 2010). Sin embargo, al construir antenas de microcinta pueden surgir algunos inconvenientes debido al comportamiento de sus componentes y al rango de frecuencia deseado. Dichos componentes deben modelarse como elementos distribuidos, no concentrados, debido a que su tamaño es proporcional a la longitud de onda de operación. También pueden presentarse fenómenos físicos como la resonancia y efectos de acoplamiento entre

componentes que pueden perjudicar el objetivo del diseño (Islam et al., 2017).

Para solucionar este tipo de problemas se utilizan técnicas computacionales con el fin de resolver las ecuaciones de Maxwell (Balanis, 1992), que explican los fenómenos de la propagación en las antenas.

Entre los métodos computacionales usados para resolver estos sistemas se encuentran: el Método de Elementos Finitos (Finite Element Method, FEM) (Zeng & Liu, 2018), el Método de Momentos (Method of Moments, MoM) (Chen & Ney, 2007; Weigand et al., 2003), el Método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (Finite-Difference Time Domain method, FDTD) (Navarro et al., 2003) y optimización por enjambre de partículas Particle Swarm Optimization (PSO) (Demircioglu et al., 2015), esta última permite mejorar el rendimiento del sistema. Debido a las respuestas obtenidas con los métodos computacionales se obtienen respuestas que permiten la optimización de las antenas y así mejorar y ajustar los parámetros del sistema deseado.

Por lo anterior, en este documento se realiza una revisión de las antenas de microcinta para sistemas de captación de energía RF, en función de sus parámetros estructurales, para identificar aspectos que generan las configuraciones realizadas en determinados diseños y así contribuir a investigaciones que desarrollan sistemas de recolección de energía electromagnética radiada por medio de antenas.

## 2. ANTENAS RECOLECTORAS DE ENERGÍA RF

Las antenas son diseñadas para resonar a determinadas frecuencias de operación, su clasificación es basada en las características y aplicaciones del diseño. Las antenas de recolección de energía están en etapa de desarrollo y con el crecimiento de la tecnología hay una gran variedad de métodos

de diseño y fabricación de antenas, para que sean compactas y eficientes. De acuerdo con lo señalado, son ideales para los teléfonos móviles, dispositivos portátiles e implantables, entre otros. Algunos de los métodos más comunes para la miniaturización de antenas de microcinta son:

- Ranuras en el parche radiante (Awais et al., 2018).
- Uso de metamateriales (Benayad & Tellache, 2020).
- Uso de sustratos de alta permitividad (Hidayah et al., 2019).
- Uso de estructuras de tierra defectuosa (DGS) (Pandhare et al., 2016).
- Modificar la longitud de onda de la antena mediante la optimización de la geometría (Rezaghali & Mohajeri, 2016).

Se ha demostrado que las antenas de banda estrecha (Choukiker et al., 2014), ofrecen alta eficiencia de conversión de energía, pero solo pueden recuperar una cantidad limitada de esta debido al estrecho ancho de banda que poseen. Por otro lado, las antenas multibanda son muy útiles debido a que son resonantes en varias frecuencias (García-Domínguez, 2010; Mathur & Gupta, 2014; Reyes-Vera et al., 2018), así como las antenas de banda ancha (Balanis, 1992; Islam et al., 2016; Zeng & Liu, 2018) y de ultra-banda ancha (UWB) (Chen & Ney, 2007; Weigand et al., 2003) que pueden recuperar más energía de las ondas de radio que hay en el espacio, aunque, estas antenas son utilizadas en sistemas de imágenes, sistemas de comunicaciones y de radar. En la Tabla 2, se realiza una comparación de varios diseños de antenas de microcinta según su tamaño.

**Tabla 2.** Comparación de diseños de antenas microcinta según el tamaño

Tipo de Antena	Técnica de reducción	Frecuencia (GHz)	BW (MHz %)	Ganancia (dBi)	Reducción de tamaño (%)
Antena invertida en F (Lin, et al., 2005)	Constante Dieléctrica alta	1,8	5,7	7	75
Antena de banda Dual fractal (Shrestha et al., 2014a)	Alfombra de Sierpinski	2,45 – 5,8	1	2,7	25,98
Antena de parche compacto (Sim et al., 2010a)	Incrustación de 4 ranuras	0,87	1,87	3,8	29
Antena de anillo dividido (Benayad & Tellache, 2020a)	Metamaterial	1,8 – 2,1, 2,45	96,3	32,4 – 3,01	63,75
Miniaturización antena parche (Lamsalli, et al., 2016)	Algoritmo genético	2,16 - 3,5	-	5,82	82

Fuente: elaboración propia

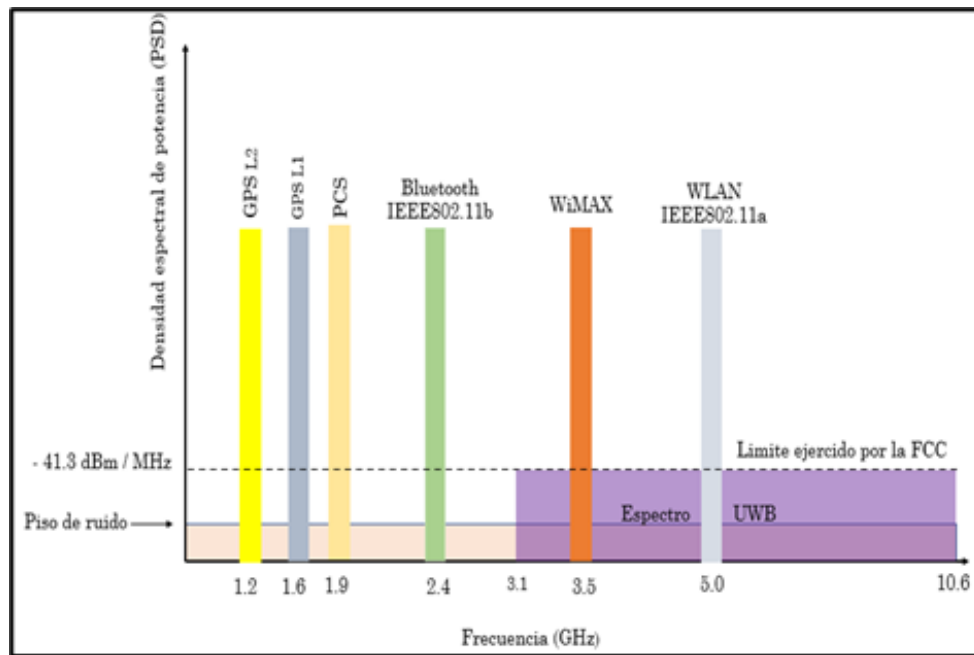
Las antenas UWB poseen cualidades especiales para sistemas de captación de energía electromagnética radiada, puesto que tienen rangos de frecuencias de operación que van desde los 3.1 a 10.6 GHz con un ancho de banda mayor o igual a 500 MHz independiente de su frecuencia central (Ren et al., 2014; Mohamed et al., 2019). UWB es una banda de frecuencia sin licencia, según la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) (Aiello & Rogerson, 2003), proporciona altas velocidades de datos y baja densidad espectral de potencia, la restricción de baja potencia de -44,3 dBm atrae una amplia gama de aplicaciones en comunicaciones de corto alcance (Doddipalli & Kothari, 2019).

Este tipo de antenas opera en las bandas de Microondas desde la banda L hasta la banda K, abarcando servicios de comunicaciones como: CDMA, UMTS, PCS, GSM y LTE; redes inalámbricas como: WPAN, WBAN, WLAN y WIMAX, también en sistemas satelitales y aplicaciones militares. En la Figura 1, se presenta el comportamiento de UWB frente a otras tecnologías de banda estrecha convencionales como: GPS L1 y L2 para sistemas de navegación satelital. L1 funciona entre 1575 MHz con un ancho de banda de 18,03 MHz y L2 en 1227 MHz con un

ancho de banda de 17,66 MHz. PCS (Servicio de Comunicación Personal), que son servicios de telefonía móvil que operan en las bandas de radio entre 1800 o 1900 MHz, con anchos de banda entre 10 y 20 MHz dependiendo del país. El sistema IEEE802.11b opera en la banda de 2,45 GHz con un ancho de banda de 25 MHz, seguido de WiMAX que trabaja en 3.1 GHz hasta 3,5 GHz con anchos de banda entre 1,25 MHz hasta 20 MHz, finalmente IEEE802.11a/g que opera en la banda ISM de 2,45 GHz a 5 GHz con un ancho de banda de 20 MHz.

### 3. METODOLOGÍA

Con el propósito de establecer un punto de referencia para la investigación sobre análisis de las antenas microcinta para cosecha de energía electromagnética radiada, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura académica (Beltrán, 2019). Esta revisión tiene como objetivo principal examinar las perspectivas de varios autores que han abordado este tema, así como los métodos, herramientas y contextos empleados hasta ahora. Además, se busca identificar las variables asociadas al diseño de antenas microcinta para el almacenamiento de energía.



**Figura 1.** Espectros de banda estrecha vs UWB Fuente: Doddipalli & Kothari (2019)

Para lograr esto, se lleva a cabo una revisión detallada que permita una comprensión clara de los conceptos, el estado actual de las investigaciones relacionadas y las contribuciones al conocimiento en este campo (Manterola et al., 2013). Diversas bases de datos bibliográficas se utilizan para recopilar información, y el software Excel se emplea para organizar y analizar los artículos encontrados.

Las revisiones sistemáticas representan una forma de investigación observacional y retrospectiva que sintetiza los resultados de múltiples estudios primarios. Su objetivo principal es resumir la información existente sobre un tema específico y determinar las variables clave y causales que influyen en la investigación (Cañas et al., 2023). Para llevar a cabo una revisión sistemática de la literatura, se proponen los siguientes cinco pasos:

1. Definir una pregunta de investigación clara que esté alineada con los objetivos e hipótesis de la investigación. En este caso, la pregunta sería: "¿Cuáles son los parámetros relacionados al diseño de antenas microcinta para el almacenamiento de energía?".
2. Establecer criterios de inclusión y exclusión para los estudios. Se considerarán únicamente los artículos que se centren específicamente en el diseño de antenas microcinta para el almacenamiento de energía.
3. Definir la estrategia de búsqueda. Se seleccionarán bases de datos que incluyan revistas de alto impacto a nivel internacional, que cubran todas las áreas del conocimiento.
4. Registrar los datos y evaluar los documentos seleccionados. Los artículos se seleccionarán de

acuerdo con criterios como la calidad de la revista en la que se publicaron, su relación con la ingeniería de electrónica y telecomunicaciones, y la relevancia del contenido en relación con el almacenamiento de energía

5. Interpretar y presentar los resultados.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Configuración de antenas microcinta

En esta sección, se realiza la caracterización de antenas utilizadas en sistemas de transferencia y recolección de energía electromagnética radiada teniendo en cuenta su configuración básica como se muestra en la Figura 2. Estas antenas son construidas con la técnica de circuitos impresos debido a las ventajas ofrecidas como: bajo costo, alto rendimiento y miniaturización del diseño (Nawaz et al., 2013).

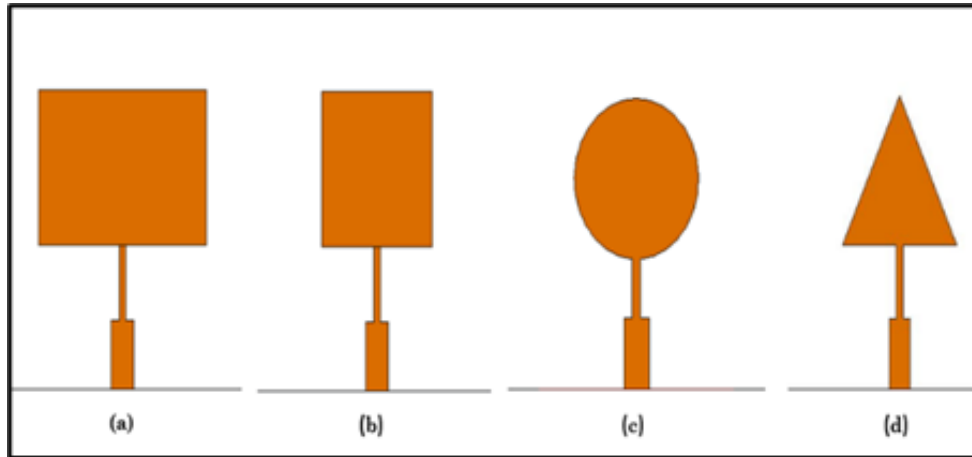
En la Figura 3, se presenta un diagrama de barras de acuerdo con la tendencia estimada sobre los diseños de antenas que son más utilizadas. Esta revisión se realiza en 40 artículos.

Según lo expuesto previamente, la configuración que es más utilizada en el diseño de antenas de microcinta es la PRMA (antena impresa rectangular monopolo), esto debido a que es fácil de diseñar y construir. El segundo caso más usado es la configuración de OTROS, donde se encuentran geometrías fractales y geometrías con muescas (huecos alargados), las cuales se realizan en el parche radiante y cumplen la función de filtros dependiendo del número de muescas realizadas en el parche radiante (Li et al., 2022). Es evidente que, existe un gran número de antenas utilizadas en la recolección de energía electromagnética radiada, lo que indica que hay un campo abierto para establecer criterios de selección. En este sentido, se debe evaluar aspectos como: la ganancia, la frecuencia de resonancia y el ancho de banda, ya que son parámetros que

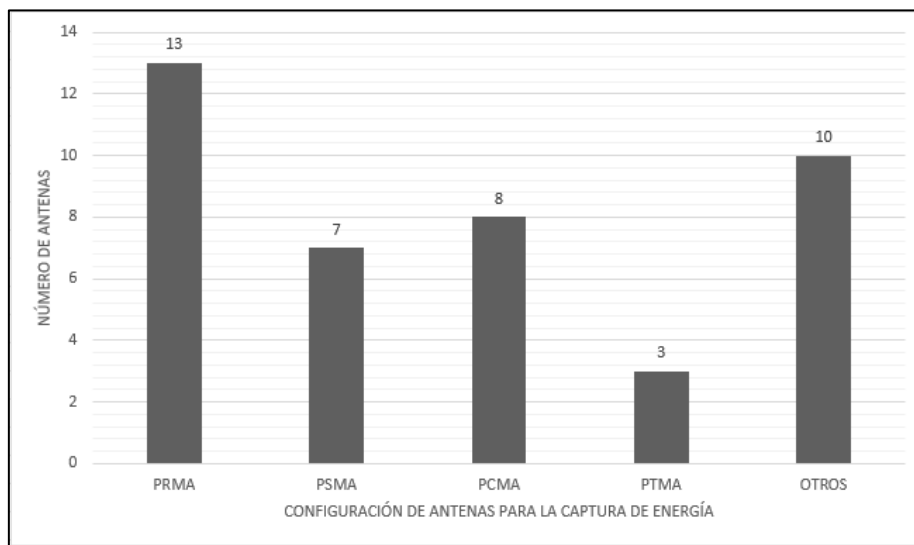
caracterizan el rendimiento de una antena como recolectora de energía (Miranda-Pantoja, 2002).

Por otra parte, también se utilizan combinaciones o arreglos de antenas conocidas como arreglo convencional de antenas de microcinta (CMAA), que constan de dos, cuatro o más parches de radiación idénticos, los cuales son agrupados y regularmente tienen forma rectangular (Awais et al., 2018; Demircioglu et al., 2015). Estos arreglos son utilizados para modificar el patrón de radiación y aumentar la ganancia, como

en Demircioglu et al., (2015), que se realizó una red de antenas microcinta convencional resonando a 5,53 GHz y produce un ancho de banda y un acoplamiento mutuo igual a 2,35 % y -17,83 dB. El primer conjunto de antenas propuesto produce un ancho de banda y un acoplamiento mutuo igual a 66,60 % y -35,66 dB, mientras que el segundo conjunto de antenas propuesto produce un ancho de banda y un acoplamiento mutuo igual a 63,27 % y -32,81 dB respectivamente. En la Tabla 3, se presenta el rango de frecuencias y aplicaciones de las antenas microcinta.



**Figura 2.** Configuración de antenas microcinta. (a) Printed Rectangular Monopole Antenna (PRMA), (Zhang et al., 2010a), (b) Printed Square Monopole Antenna (PSMA) (Ojaroudi et al., 2009a), (c) Printed Circular Monopole Antenna (PCMA),(Mondal & Sarkar, 2012), (d) Printed Triangle Monopole Antenna (PTMA), (Lin et al., 2005). Fuente: elaboración propia



**Figura 3.** Tendencia de antenas diseñadas en función de su configuración. Fuente: elaboración propia

**Tabla 3.** Rango de Frecuencias y aplicaciones de las Antenas microcinta

Configuración	Rango (GHz)	Aplicaciones
PRMA	0,84-18,0	2,45/5 GHz, WIMAX, Satélites
PSMA	2,26-22,5	2,45 GHz, WLAN, WPAN, GPS
PCMA	1,50-20,0	2,45 GHz, WLAN, WPAM, WBAN
PTMA	1,40-11,6	2,45 GHz, UMTS, PCS

Fuente: elaboración propia

#### 4.2. Modificaciones en la estructura de las Antenas microcinta

Generalmente para la construcción de antenas tipo parche, se usa un material conductor como el cobre acompañado de un dieléctrico, donde puede variar la permitividad eléctrica dependiendo del material utilizado y esto permite una reducción en las dimensiones de los diseños y disminuye las pérdidas en el dieléctrico (Benayad & Tellache, 2020b; Mohd Yunus et al., 2019; Pandhare et al., 2016).

La estructura de las antenas se puede modificar desde el parche radiante hasta el plano de referencia, dependiendo de la aplicación, para esto existen técnicas como: las estructuras fractales que son compactas, multibanda o de banda ancha, que tienen aplicaciones útiles en comunicaciones para telefonía celular y microondas (Shrestha et al., 2014b; Sim et al., 2010b; Rezagholi & Mohajeri, 2016) y elementos parásitos utilizados para modificar el patrón de radiación de una antena (Lamsalli, et al., 2016).

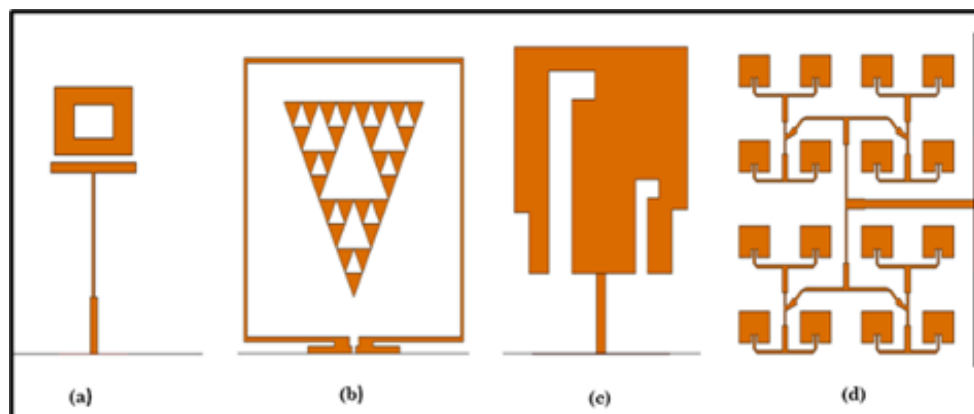
También, se utilizan técnicas de ranura para disminuir la pérdida de potencia debido a la reducción del acoplamiento entre las antenas radiantes (Mohd Yunus et al., 2019), luego, están las combinaciones de antenas de ranura y resonadores que ofrecen un ancho de banda amplio además de otras ventajas como: alta ganancia, alta eficiencia de radiación, baja pérdidas en los conductores y compatibilidad con diferentes mecanismos de alimentación (Aiello & Rogerson, 2003; Ren et al., 2014; Mohamed et al., 2019). Los arreglos de antenas están conformados por un conjunto de antenas iguales, que están alineadas de forma que se suman sus diagramas de radiación (Doddipalli & Kothari, 2019).

Las técnicas de modificación y adición de elementos parásitos de diferentes geometrías en los parches sirven para mejorar el acoplamiento de impedancia. También, eliminando material del parche radiante o del plano de referencia con formas de ranuras, y al aplicar estructuras fractales en el parche resonante se pueden mejorar los parámetros de la antena para conseguir una máxima transferencia de potencia y disminuir las pérdidas de retorno en la frecuencia de operación. En la Tabla 4, se resumen brevemente algunas técnicas y geometrías más utilizadas para modificar antenas de microcinta. En la Figura 4, se observan diferentes geometrías y arreglos de antenas microcinta.

**Tabla 4.** Técnicas y geometrías más utilizadas para modificar Antenas microcinta

Técnica	Objetivo	Referencias
Estructuras Fractales	Reducir dimensiones de la antena Aumentar el ancho de banda	(Nawaz et al., 2013; Ojaroudi et al., 2009b; Zhang et al., 2010b)
Ranuras, elementos parásitos	Mejorar la ganancia, el acople De impedancia, reducen Las dimensiones de la antena	(Aiello & Rogerson, 2003; Ren et al., 2014)
Arreglo de antenas	Mejoran la ganancia, cambian el Patrón de radiación	(Bansal, 1983; Kim & Nam, 2017; C.-C. Lin et al., 2005)

Fuente: elaboración propia



**Figura 4.** (a) Antena con anillo Resonador, (b) Antena Fractal Triángulo de Sierpinski con anillo resonador, (c) Antena Ranurada, (d) Array de Antenas.

Fuente: elaboración propia

#### 4.3. Parámetros técnicos

Entre los parámetros técnicos de las antenas de microcinta, para que el parche radie, se debe excitar mediante dispositivos de alimentación como son: por la línea de transmisión, por proximidad, por ranura radiante y por cable coaxial (Weigand et al., 2003). Además de otros parámetros como:

##### 4.3.1. Factor ( $Q$ ) factor de calidad

En los circuitos eléctricos, el factor  $Q$  de un circuito sintonizado (incluyendo antenas) describe cuantas veces pasa la corriente a través del circuito, es decir cuánto aumenta el

voltaje pico cuando el sistema resuena a una frecuencia resonante (Liu et al., 2020; Lopes et al., 2018). El factor Q es una medida de la eficiencia de radiación de la antena.

La ecuación del factor Q se puede expresar como:

$$Q = 2\pi \frac{\text{energía almacenada}}{\text{energía disipada por ciclo}} \text{ o } Q = \frac{f_c}{\Delta f} \quad (1)$$

Dónde  $f_c$  = frecuencia central y  $\Delta f = f_2 - f_1$  de la ecuación anterior se deduce que un factor Q alto viene con un ancho de banda resonante estrecho, pero se obtiene una ganancia de voltaje alta en la resonancia. Igualmente, también señala que el factor Q es inversamente proporcional a la energía disipada por ciclo.

#### 4.3.2. Eficiencia de conversión

La eficiencia es la relación entre la potencia radiada por una antena y la potencia entregada a la misma (Bansal, 1983). La eficiencia de conversión de potencia es la relación entre la cantidad de energía aplicada y la carga recuperada por la antena. Sin considerar las pérdidas en el espacio libre, esta se calcula así:

$$\eta_{PCE} = \frac{P_{load}}{P_{retrived}} \quad (2)$$

Dónde  $P_{load}$  = energía entregada a la carga,  $P_{retrived}$  = energía recuperada en la antena.

#### 4.3.4. Sensibilidad

La sensibilidad es definida como la potencia mínima que se requiere para activar el funcionamiento del sistema (antena) (Miranda-Pantoja, 2002):

$$\text{Sensibilidad (dBm)} = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{1 \text{ mW}} \right) \quad (3)$$

Dónde  $P$  = potencia mínima para activar un sistema.

Los anteriores parámetros son utilizados para realizar comparaciones. Aun así, existen compensaciones entre estos valores, algunos como la distancia de operación y la eficiencia general. Otro factor es el bajo costo en la fabricación de las antenas. De manera similar, la ganancia de una antena (en una dirección dada) es considerada como la relación entre el valor de la intensidad de la señal transmitida en la dirección más eficiente. Si se utiliza como referencia una antena isotrópica, este parámetro será medido en dBi, entonces la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena se irradia isotrópicamente, la intensidad de radiación correspondiente es igual a la potencia aceptada (entrada) por la antena (Bansal, 1983).

Se debe tener en cuenta que las antenas no siempre transmiten energía de forma esférica (antena isotrópica), el radiador ideal no existe en la práctica, pero el concepto es de gran utilidad para analizar el comportamiento en antenas reales (Valenzuela Medina, 2005). Ya que, estas transmiten energía en algunas direcciones específicas de acuerdo con su diseño.

Así que, dependiendo de las aplicaciones se podría optar por usar antenas de alta ganancia para la transmisión de radiofrecuencias si se conociera la posición de la fuente emisora para ubicar las antenas receptoras. Sin embargo, si la posición de la fuente y la antena receptora son relativamente desconocidas, es preferible usar una antena de baja ganancia para recolectar señales simultáneamente desde varias direcciones.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Puesto que, las antenas son diseñadas para resonar a determinadas frecuencias de operación, su clasificación se basa en las características y aplicaciones del diseño. Las antenas de recolección de energía están en etapa de desarrollo, con el crecimiento de la tecnología hay una gran variedad de métodos de diseño y fabricación de antenas, para que sean compactas y eficientes. En cuanto al comportamiento de las ondas electromagnéticas y la relación que depende de la distancia entre la antena transmisora y la antena receptora, existen características que se clasifican en dos segmentos: campo lejano y campo cercano (Yaghjian, 1986).

El patrón de onda electromagnética en el campo lejano es relativamente uniforme, mientras que, en el campo cercano, es muy fuerte e independiente de los componentes eléctricos y magnéticos, de modo que un componente puede dominar al otro. En consecuencia, la región de campo cercano se considera como el espacio que se encuentra dentro de la distancia del Fraunhofer o como el comportamiento de propagación de las señales de Radio frecuencia, debido a que existe directa dependencia con las características del gradiente de la atmósfera del lugar donde se diseña un radio enlace de microondas, la región del campo lejano se encuentra fuera de la distancia del Fraunhofer (Selvan & Janaswamy, 2017; Parrent et al., 1964).

### 5.1 Comparación de resultados de diferentes diseños de antenas para captación de energía RF

La Tabla 5 muestra la comparación de resultados de varios diseños de antenas microcinta basados en potencia de entrada, potencia de salida, ganancia de antena y eficiencia de conversión total alcanzada en diferentes frecuencias de resonancia. También es importante conocer la energía que consumen algunos dispositivos o sensores de baja potencia como se indica en la Tabla 6.

## 6. CONCLUSIONES

Como las radiaciones de RF ambientales son débiles y abarcan un amplio espectro de frecuencias, las antenas con ancho de banda de gran impedancia, alta ganancia y eficiencia de radiación son las que predominan en la elección de los investigadores. Las características antes mencionadas se pueden lograr y mejorar aplicando técnicas de modificación, el uso de ranuras es una de las técnicas más relevante, ya que son utilizadas de alguna forma en los demás diseños.

En este documento, los autores no optaron por seleccionar ninguna de las opciones de diseño y técnicas ya que no se

evaluaron los materiales utilizados en el diseño de antenas tipo parche, estos son fundamentales para evaluar el rendimiento de una antena recolectora de energía ya que sus propiedades

físicas y químicas intervienen de forma directa en el comportamiento de la antena.

**Tabla 5.** Comparación de resultados de diferentes Diseños de Antenas captadoras de energía RF

Frecuencia	Tipo de antena	Potencia de entrada	Potencia de salida	Eficiencia	Cita
2,45 GHz	Bow tie-shaped	-30 a -5 dBm	-	67 a -5 dBm	(Song et al., 2016)
900 MHz	Square- Dipolo	0-9 dBm	-	60 a 7 dBm	(Ladan et al., 2013)
5,8 GHz	Dipolo	100-20 dBm	-	76 a 20 dBm	(Tu et al., 2007)
2,45 GHz	Parche rectangular	-30 a 15 dBm	-	83 a 0 dBm	(Hucheng Sun et al., 2012)
2,1-2,45 GHz	Anillo resonador	0-20 dBm	-	84 a -15 dBm	(Takhedmit et al., 2012)
850 MHz-1.94 GHz	Monopolo Triangular	0-10 dBm	-	60 a 980 dBm	(Arrawatia et al., 2015)
900 MHz	Antena diferencial	-10 a 15 dBm	-	65.3 a 3 dBm	(Kumar & Chaudhary, 2018)
2,45 GHz	Parche rectangular	13 dBm	4.2 V	14 dBm	(Nie et al., 2015)

Fuente: elaboración propia

**Tabla 6.** Cantidad de potencia utilizada por algunos dispositivos y sensores

Dispositivo	Potencia utilizada
Wi-Fi	210 $\mu$ W
Detector de humo	55 $\mu$ W
Smartwatch	31 mW
Led	60 mW
Smartphone	0,5 W
Mouse	20 mW
Detector de CO	1,5 mW
Medidor de Gas	5,12 mW
Bombilla	1 W
Calculadora pequeña	2 $\mu$ W
Audifono	1,5 mW
Termómetro digital	20 $\mu$ W

Fuente: Tu et al. (2007)

Finalmente, dependiendo del material utilizado y las variables previamente mencionadas, se pueden lograr diseños más compactos a frecuencias de resonancia más altas. Al realizar combinaciones de diferentes configuraciones las antenas pueden ser optimizadas para la recolección de energía electromagnética radiada. También, se puede afirmar que las

antenas UWB pueden aplicarse para la recolección de energía RF, ya que poseen un amplio ancho de banda y representan buenas características de ajuste de impedancia.

## 7. RECOMENDACIONES



Para futuras investigaciones, se recomienda un análisis más profundo de las diferentes técnicas y diseños de antenas tipo parche, sin discriminar en aplicaciones para la recolección de energía. Adicionalmente, se podría realizar la simulación de la combinación de los diferentes tipos de diseños para diversas aplicaciones incluyendo la recolección de energía de tal manera que se tenga un horizonte más cercano de los resultados y así posterior aplicación en el ámbito de un laboratorio.

Se recomienda también, la revisión del problema de investigación utilizando la metodología de análisis bibliométrico, con el fin de determinar diferentes variables que señalen de forma más clara la tendencia de investigación en el tema estudiado. Se recomienda a los lectores para continuar fortaleciendo el conocimiento sobre diseño de antenas microcinta consultar los libros de DAVID M. POZAR.

## REFERENCIAS

- Aiello, G. R., & Rogerson, G. D. (2003). Ultra-Wideband Wireless Systems. *IEEE Microwave Magazine*, 4(2), 36–47. <https://doi.org/10.1109/MMW.2003.1201597>
- Arrawatia, M., Baghini, M., & Kumar, G. (2015). Broadband Bent Triangular Omnidirectional Antenna for RF Energy Harvesting. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2427232>
- Awais, Q., Jin, Y., Chattha, H. T., Jamil, M., Qiang, H., & Khawaja, B. A. (2018). A Compact Rectenna System With High Conversion Efficiency for Wireless Energy Harvesting. *IEEE Access*, 6, 35857–35866. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2848907>
- Balanis, C. A. (1992). Antenna theory: a review. *Proceedings of the IEEE*, 80(1), 7–23. <https://doi.org/10.1109/5.119564>
- Bansal, R. (1983). Antenna theory. *IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter*, 25(2), 21–22. <https://doi.org/10.1109/MAP.1983.27674>
- Beltrán, O. A. (2005). Revisiones sistemáticas de la literatura. *Rev Colomb Gastroenterol*, 20, 60–69. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcg/v20n1/v20n1a09.pdf>
- Benayad, A., & Tellache, M. (2020a). A compact energy harvesting multiband rectenna based on metamaterial complementary split ring resonator antenna and modified hybrid junction ring rectifier. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(2), 1–11. <https://doi.org/10.1002/mmce.22031>
- Benayad, A., & Tellache, M. (2020b). A compact energy harvesting multiband rectenna based on metamaterial complementary split ring resonator antenna and modified hybrid junction ring rectifier. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(2). <https://doi.org/10.1002/mmce.22031>
- Brown, W. C. (1996). The history of wireless power transmission. *Solar Energy*, 56(1), 3–21. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(95\)00080-B](https://doi.org/10.1016/0038-092X(95)00080-B)
- Chen, Z., & Ney, M. M. (2007). Method of Moments: A General Framework for Frequency- and Time-domain Numerical Methods. *2007 Workshop on Computational Electromagnetics in Time-Domain*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/CEMTD.2007.4373527>
- Choukiker, Y. K., Sharma, S. K., & Behera, S. K. (2014). Hybrid Fractal Shape Planar Monopole Antenna Covering Multiband Wireless Communications With MIMO Implementation for Handheld Mobile Devices. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(3), 1483–1488. <https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2295213>
- Demircioglu, E., Yagli, A. F., Gulgonul, S., Ankishan, H., Tartan, E. O., Sazli, M. H., & Imeci, T. (2015). Slot Parameter Optimization for Multiband Antenna Performance Improvement Using Intelligent Systems. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2015/165717>
- Doddipalli, S., & Kothari, A. (2019). Compact UWB Antenna With Integrated Triple Notch Bands for WBAN Applications. *IEEE Access*, 7, 183–190. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2885248>
- García-Domínguez, A. (2010). *Cálculo de antenas : antenas de última generación para tecnología digital y métodos de medición*. Marcombo.
- Hucheng Sun, Yong-xin Guo, Miao He, & Zheng Zhong. (2012). Design of a High-Efficiency 2.45-GHz Rectenna for Low-Input-Power Energy Harvesting. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 929–932. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2212232>
- Islam, M. T., Samsuzzaman, M., Islam, M. M., Mahmud, M. Z., & Islam, M. T. (2016). A compact patch antenna for ultrawideband application. *2016 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICISSET.2016.7856512>
- Ren, J., Hu W., Yin, Y. & Fan, R. (2014). Compact Printed MIMO Antenna for UWB Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 1517–1520. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2343454>
- Kim, J.-H., & Nam, S. (2017). A Compact Quasi-Isotropic Antenna Based on Folded Split-Ring Resonators. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 294–297. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2573849>
- Kumar, D., & Chaudhary, K. (2018). DESIGN OF DIFFERENTIAL SOURCE FED CIRCULARLY POLARIZED RECTENNA WITH EMBEDDED SLOTS FOR HARMONICS SUPPRESSION. *Progress In Electromagnetics Research C*, 84, 175–187. <https://doi.org/10.2528/PIERC18021401>
- Ladan, S., Ghassemi, N., Ghiotto, A., & Wu, K. (2013). Highly Efficient Compact Rectenna for Wireless Energy Harvesting Application. *IEEE Microwave Magazine*, 14(1), 117–122. <https://doi.org/10.1109/MMM.2012.2226629>
- Lamsalli, M., El Hamichi, A., Boussouis, M., Touhami, N. A., & Elhamadi, T. E. (2016). Genetic algorithm optimization for microstrip patch antenna miniaturization. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 60(May), 113–120. <https://doi.org/10.2528/PIERL16041907>

- Li, Y., Meyer, J., Lokki, T., Cuenca, J., Atak, O., & Desmet, W. (2022). Benchmarking of finite-difference time-domain method and fast multipole boundary element method for room acoustics. *Applied Acoustics*, *191*, 108662. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108662>
- Lin, C. C., Kan, Y. C., Kuo, L. C., & Chuang, H. R. (2005). A planar triangular monopole antenna for UWB communication. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, *15*(10), 624–626. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2005.856694>
- Liu, Y., Cai, Y., Zhang, Y., Tovstopyat, A., Liu, S., & Sun, C. (2020). Materials, Design, and Characteristics of Bulk Acoustic Wave Resonator: A Review. *Micromachines*, *11*(7), 630. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/mi11070630>
- Lopes A.C., Sagasti A., Lasheras A., Muto V., Gutiérrez J., Kouzoudis D., Barandiarán J.M. (2018). Accurate Determination of the Q Quality Factor in Magnetoelastic Resonant Platforms for Advanced Biological Detection. *Sensors (Basel)*, *18*(3). <http://10.3390/s18030887>
- Manterola, C., Astudillo, P., Arias, E. y Claros, N. (2013). Revisión sistemática de la literatura. Qué se debe saber acerca de ellas. *Cir Esp*, *91*(3), 149–155. <http://10.1016/j.ciresp.2011.07.009>
- Mathur, V., & Gupta, M. (2014). Comparison of performance characteristics of rectangular, square and hexagonal microstrip patch antennas. *Proceedings of 3rd International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICRITO.2014.7014684>
- Miranda-Pantoja, J. M. (2002). *Ingeniería de microondas: técnicas experimentales*. Prentice Hall.
- Mohamed, I., Abdalla, M., & Mitkees, A. E.-A. (2019). Perfect isolation performance among two-element MIMO antennas. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, *107*, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.05.014>
- Mohd Yunus, N., Yunas, J., Pawi, A., Rhazali, Z., & Sampe, J. (2019). Investigation of Micromachined Antenna Substrates Operating at 5 GHz for RF Energy Harvesting Applications. *Micromachines*, *10*(2), 146. <https://doi.org/10.3390/mi10020146>
- Mondal, S., & Sarkar, P. P. (2012). Wideband Bidirectional Planar Shorted Circular Monopole Antenna. *Procedia Technology*, *4*, 421–426. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.05.066>
- Navarro, E. A., Segura, J., & Sanchis Francés, R. (2003). Aplicación del método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD) al estudio de problemas acústicos bidimensionales. *Revista de Acústica*, *34*(3–4), 19–28.
- Nawaz, M. I., Huiling, Z., Sultan Nawaz, M. S., Zakim, K., Zamin, S., & Khan, A. (2013). A review on wideband microstrip patch antenna design techniques. *2013 International Conference on Aerospace Science & Engineering (ICASE)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICASE.2013.6785554>
- Nie, M.-J., Yang, X.-X., Tan, G.-N., & Han, B. (2015). A Compact 2.45-GHz Broadband Rectenna Using Grounded Coplanar Waveguide. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *14*, 986–989. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2388789>
- Ojaroudi, M., Ghanbari, G., Ojaroudi, N., & Ghobadi, C. (2009a). Small square monopole antenna for UWB applications with variable frequency band-notch function. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *8*, 1061–1064. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2009.2030697>
- Ojaroudi, M., Ghanbari, G., Ojaroudi, N., & Ghobadi, C. (2009b). Small Square Monopole Antenna for UWB Applications With Variable Frequency Band-Notch Function. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, *8*, 1061–1064. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2009.2030697>
- Pandhare, R. A., Zade, P. L., & Abegaonkar, M. P. (2016). Miniaturized microstrip antenna array using defected ground structure with enhanced performance. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *19*(3), 1360–1367. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.03.007>
- Parrent, G. B., Thompson Jr, B. J., George Parrent, by B., & Thompson, B. J. (1964). On the Fraunhofer (Far Field) Diffraction Patterns of Opaque and Transparent Objects with Coherent Background. *Optica Acta: International Journal of Optics*, *11*(3), 183–193. <https://doi.org/10.1080/713817880>
- Parthiban, P. (2020). IoT Antennas for Industry 4.0 – Design and Manufacturing with an Example. *2020 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/IEMTRONICS51293.2020.9216349>
- Reyes-Vera, E., Senior, D. E., Luna-Rivera, J. M., & López-Giraldo, F. E. (2018). Advances in electromagnetic applications and communications. *TecnoLógicas*, *21*(43), 9–13. <https://doi.org/10.22430/22565337.1052>
- Rezaghali, A., & Mohajeri, F. (2016). Directivity optimization of fractal antenna arrays using PSO algorithm. *2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 1224–1228. <https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2016.7585708>
- Selvan, K. T., & Janaswamy, R. (2017). Fraunhofer and Fresnel Distances: Unified derivation for aperture antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, *59*(4), 12–15. <https://doi.org/10.1109/MAP.2017.2706648>
- Shrestha, S., Lee, S. R., & Choi, D. Y. (2014a). A new fractal-based miniaturized dual band patch antenna for RF energy harvesting. *International Journal of Antennas and Propagation*, *2014*. <https://doi.org/10.1155/2014/805052>
- Shrestha, S., Lee, S. R., & Choi, D.-Y. (2014b). A New Fractal-Based Miniaturized Dual Band Patch Antenna for RF Energy Harvesting. *International Journal of Antennas and Propagation*, *2014*, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2014/805052>
- Sim, Z. W., Shuttleworth, R., Alexander, M. J., & Grieve, B. D. (2010a). Compact patch antenna design for outdoor rf energy harvesting in wireless sensor networks. *Progress in Electromagnetics Research*, *105*(January 2015), 273–294. <https://doi.org/10.2528/PIER10052509>

- Sim, Z. W., Shuttleworth, R., Alexander, M. J., & Grieve, B. D. (2010b). COMPACT PATCH ANTENNA DESIGN FOR OUTDOOR RF ENERGY HARVESTING IN WIRELESS SENSOR NETWORKS. *Progress In Electromagnetics Research*, 105, 273–294. <https://doi.org/10.2528/PIER10052509>
- Song, C., Huang, Y., Carter, P., Zhou, J., Yuan, S., Xu, Q., & Kod, M. (2016). A Novel Six-Band Dual CP Rectenna Using Improved Impedance Matching Technique for Ambient RF Energy Harvesting. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(7), 3160–3171. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2565697>
- Takhedmit, H., Cirio, L., Bellal, S., Delcroix, D., & Picon, O. (2012). Compact and efficient 2.45 GHz circularly polarised shorted ring-slot rectenna. *Electronics Letters*, 48(5), 253. <https://doi.org/10.1049/el.2011.3890>
- Tran, LG., Cha, HK. & Park, WT. (2017). RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications. *Micro and Nano Syst Lett* 5, 14. <https://doi.org/10.1186/s40486-017-0051-0>
- Tu, W.-H., Hsu, S.-H., & Chang, K. (2007). Compact 5.8-GHz Rectenna Using Stepped-Impedance Dipole Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 6, 282–284. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2007.898555>
- Valenzuela Medina, J. E. (2005). *Aplicación del Método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo a la simulación del Campo Electromagnético*. 52(1), 58–64.
- Weigand, S., Huff, G. H., Pan, K. H., & Bernhard, J. T. (2003). Analysis and design of broad-band single-layer rectangular u-slot microstrip patch antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(3), 457–468. <https://doi.org/10.1109/TAP.2003.809836>
- Yaghjian, A. (1986). An overview of near-field antenna measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34(1), 30–45. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143727>
- Zeng, W., & Liu, G. R. (2018). Smoothed Finite Element Methods (S-FEM): An Overview and Recent Developments. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 25(2), 397–435. <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9202-3>
- Zhang, Z., Fu, G., & Zuo, S. (2010a). A compact printed monopole antenna for wlan and wimax applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 52(4), 857–861. <https://doi.org/10.1002/mop.25060>
- Zhang, Z., Fu, G., & Zuo, S. (2010b). A compact printed monopole antenna for WLAN and WiMAX applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 52(4), 857–861. <https://doi.org/10.1002/mop.25060>

## BIOGRAFÍAS



**Edison Andrés, Zapata Ochoa,** Obtuvo el título de ingeniero de Telecomunicaciones en el año 2018. Es Magister en Automatización y Control Industrial del Instituto Tecnológico Metropolitano ITM, Medellín Colombia. Sus temas de interés están enfocados en el diseño y análisis de antenas para cosecha de energía electromagnética radiada.



**Francisco Eugenio, López Giraldo,** Obtuvo su grado de Física en 2003, su grado de Maestría en física 2007 y su título de Doctor en física en 2009 de la Universidad de Antioquia, Colombia. Durante sus estudios de doctorado estudio las propiedades ópticas y electrónicas en nanoestructuras semiconductoras, específicamente en el estudio del factor  $g$  de Landé. En 2008 realizó una pasantía en la UNICAMP estudiando las propiedades ópticas de heteroestructuras semiconductoras. Desde el 2009 él está vinculado como Investigador en el Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM, Medellín Colombia.



**Vanessa García, Pineda,** Es ingeniera de telecomunicaciones y Magister en Gestión de Innovación Tecnológica, Cooperación y Desarrollo Regional del Instituto Tecnológico Metropolitano. Actualmente es docente investigadora tiempo completo de la Corporación Universitaria Americana. Sus principales áreas de interés se encuentran enfocadas en la investigación de comunicaciones ópticas y la gestión de la innovación tecnológica.

