



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- SCOPUS
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Current Mathematical Publications
- MathSci
- Revencyt
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



REVISTA TÉCNICA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Hacia los 130 años de creación de la Universidad del Zulia

"Buscar la verdad y afianzar los valores trascendentales", misión de las universidades en su artículo primero, inspirado en los principios humanísticos. Ley de Universidades 8 de septiembre de 1970.

Rectennas for Energy Harvesting from RF Communication Systems: A Review

Andry Contreras , Maryory Urdaneta 

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, C.P. 4001, Venezuela.

*Autor de Contacto: acontreras@fing.luz.edu.ve

<https://doi.org/10.22209/rt.v43n2a06>

Recepción: 22/07/2019 | Aceptación: 01/04/2020 | Publicación: 01/05/2020

Abstract

The purpose of this work was to characterize the performance of rectennas used on radiofrequency communication systems in order to identify relevant aspects in their different elements. In this research, a documental review of rectennas' articles for mobile telephony, wireless local area networks (WLAN) and ISM applications was carried out. Results showed that the monopole with rectangular patch has been the most used antenna. The voltage doubler has been the most utilized rectifier, which has a maximum conversion efficiency of 93%. Additionally, conventional impedance matching of L-section has been the most used interconnection element. The highest maximum conversion efficiency obtained was 87% for WLAN at 2.45 GHz system. It was concluded that there is a wide variety of criteria to design rectennas for a determined application. Future research could be conducted to establish particular criteria for each application with the purpose of determining the configuration that has the best performance and to optimize each element of the rectenna in order to obtain a higher conversion efficiency and to harvest more energy.

Keywords: Rectennas; Energy Harvesting; RF Communication Systems.

Rectenas para el Cosechamiento de Energía de los Sistemas de Comunicaciones en RF: Una Revisión

Resumen

El presente artículo tuvo como objetivo caracterizar el desempeño de las rectenas utilizadas en los sistemas de comunicaciones en radiofrecuencia, con la finalidad de identificar aspectos relevantes en las distintas etapas que conforman esta fuente de energía. En esta investigación, se realizó una revisión documental de artículos acerca de rectenas que recolectan energía de los sistemas de telefonía móvil, redes de área local inalámbrica (WLAN) y aplicaciones ISM. Los resultados muestran que la antena más empleada en estos sistemas ha sido la monopolo con parche rectangular. El rectificador más usado ha sido el doblador de voltaje, con el cual se ha obtenido una eficiencia de conversión RF-DC máxima de 93%. Adicionalmente, se obtuvo que el elemento de interconexión más utilizado ha sido el acoplador de impedancia de sección L convencional. La máxima eficiencia de conversión obtenida fue 87% para el sistema WLAN a 2,45 GHz. Se concluye que existe una variedad de criterios para el diseño de rectenas para una aplicación dada. Como futuras investigaciones se plantea establecer criterios particulares para cada aplicación que permitan obtener el mejor rendimiento posible y optimizar las etapas de las rectenas para alcanzar una mayor eficiencia de conversión y cosechar más energía.

Palabras clave: Rectenas; Cosechamiento de Energía; Sistemas de Comunicaciones en RF.

Introducción

En las últimas décadas, se han desarrollado una serie de sistemas inalámbricos para el intercambio de información, monitoreo de fenómenos físicos, control de eventos, entre otros, con mayores tasas de transmisión y facilitando la interconexión de diversos dispositivos [1], [2]. Esto ha permitido que un mayor número de abonados o usuarios usen estos sistemas en su vida cotidiana, tanto en aplicaciones domésticas como comerciales [3, 4].

Este desarrollo ha conllevado a que el espectro de ondas electromagnéticas se ocupe cada vez más, y a la vez se emita energía electromagnética que no está siendo aprovechada en su totalidad. De esta manera, la energía radiada en un área pudiera no ser utilizada efectivamente y en este caso pudiera reciclarse y convertirse en energía eléctrica para diversas aplicaciones [5].

Existen varios métodos para cosechar energía inalámbrica que dependen principalmente de la distancia entre el transmisor y el receptor. Para distancias cortas, alrededor de los centímetros, destacan los métodos de acople inductivo y capacitivo que operan a frecuencias entre 10 kHz y varias decenas de MHz [6–10]. Para distancias mayores, se emplean rectenas, también denominadas antenas rectificadoras, que captan las ondas electromagnéticas para valores de frecuencia superiores a 850 MHz, rango en el que actualmente se siguen desarrollando servicios [5, 6, 11].

El empleo de estos dispositivos tiene como ventajas que su tiempo de vida es casi ilimitado ya que no es necesario su reemplazo, y que son sostenibles debido a que reciclan la energía electromagnética que está en el ambiente [5]. No obstante, en la implementación de las rectenas no existe un único modelo para una aplicación dada; se han propuesto distintas configuraciones de antenas y rectificadores para cosechar energía en un mismo sistema. Además, se han agregado elementos adicionales para mejorar su rendimiento [11].

El objetivo de este artículo es caracterizar el desempeño de las rectenas que cosechan energía de radiofrecuencia (RF) de los sistemas de comunicaciones basándose en la revisión de investigaciones previas, con el fin de identificar aspectos relevantes en las distintas etapas que conforman esta fuente de energía, tanto de las configuraciones de antenas y rectificadores empleados, como de los elementos que mejoran su rendimiento. Finalmente, se sugieren temas para investigaciones futuras que contribuyan con el desarrollo de esta área para mejorar la eficiencia de conversión y fortalecer este método de obtención de energía sostenible.

La revisión documental se basó en los artículos originales y de revisión, los trabajos presentados en

conferencias y simposios, más relevantes de los últimos cinco años que están registrados en las bases de datos de Scopus, IEEE Xplore y SCImago. En dichos documentos, el evento de estudio fueron las rectenas para cosechar energía de sistemas de comunicaciones en RF, desde 900 MHz hasta 5,8 GHz, tales como los sistemas de telefonía móvil GSM (Global Systemfor Mobile Communications), UMTS (Universal Mobile TelecommunicationSystem) y LTE (Long-TermEvolution); redes de área local inalámbrica (Wireless Local Area Networks, WLAN); y las bandas de ISM (Industrial, Scientific and Medical). Para el análisis de los resultados se emplearon gráficas circulares, de barras y de dispersión, lo cual permitió determinar los aspectos relevantes de los parámetros técnicos de las rectenas.

Rectenas para Sistemas RF

La estructura básica de la rectena está constituida por dos etapas: la de recepción y la de conversión de energía, en las cuales se emplean antenas y rectificadores respectivamente. Entre estas etapas se puede colocar un acoplador de impedancia (Figura 1) para disminuir la pérdida de energía durante el proceso de conversión [12], que es originada por fenómenos físicos, tales como la resonancia espontánea y los efectos parásitos, causados por los tamaños de los elementos que son similares a la longitud de onda de operación [11, 13, 14].

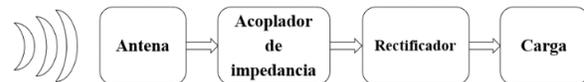


Figura 1. Estructura básica de las rectenas.

Al caracterizar la eficiencia de conversión máxima de las rectenas se observaron valores diversos, como se muestra en la Figura 2. Para el sistema GSM/ISM en la banda de 900 MHz, la mejor eficiencia máxima fue 75% para un nivel de potencia de entrada de -1 dBm [15], lo cual fue un buen resultado ya que para valores debajo de -1 dBm se han obtenido valores inferiores al 41%. Para ello, los autores implementaron la técnica HRC (Hybrid Resistance Compression) en el circuito de rectificación. Para la banda de 1800 MHz de GSM, se obtuvo una eficiencia del 67,6% a 10 dBm [16] y el resto de rectenas diseñadas para cosechar energía en esta banda tuvieron una potencia de entrada inferior a -7 dBm con una eficiencia inferior al 33%.

En el sistema de comunicación UMTS se obtuvo un 45% de eficiencia de conversión para un nivel de potencia de entrada de -7 dBm [17]. Este valor de eficiencia máxima es superior al obtenido en GSM a 1800 MHz, si se les compara con el mismo nivel de potencia de entrada. Para el sistema LTE se obtuvo 70% a 5 dBm empleando un acoplador de impedancia doble que maximizó la energía

cosechada [18]. En WLAN/ISM a 2,45 GHz se obtuvo 87% a una potencia de 6,4 dBm mediante el uso de un rectificador de doble acceso [19]. Mientras que en WLAN/ISM a 5 GHz, se obtuvo 64% a 4 dBm [20].

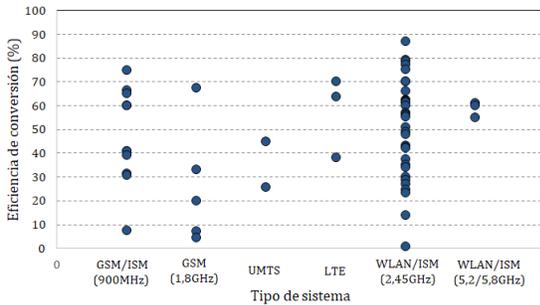


Figura 2. Eficiencia de conversión máxima en función de los sistemas RF.

De esta manera, se aprecia que los mayores valores de eficiencia de conversión máxima se han obtenido en los dos sistemas de comunicaciones más estudiados en los últimos años, siendo el sistema WLAN/ISM a 2,45 GHz el que presentó el mayor valor, seguido del GSM a 900 MHz. En este orden de ideas, existe un vacío en profundizar en el desarrollo de rectenas para mejorar la captación de energía de los sistemas UMTS, LTE y WLAN a 5 GHz, que tienen un crecimiento significativo en los últimos años [21].

En la Tabla 1 se registra el promedio (μ) y desviación estándar (σ) de la eficiencia de conversión máxima, en donde las rectenas diseñadas para el sistema GSM a 1,8 GHz presentaron el menor valor promedio y mayor desviación estándar, por lo cual futuras investigaciones pueden enfocarse en diseñar rectenas con un mejor rendimiento en dicha banda. Adicionalmente, se aprecia que las rectenas diseñadas para el sistema WLAN a 5,8 GHz tuvieron una eficiencia promedio alta y con poca desviación para niveles de potencia de entrada entre -3,0 y 6,5 dBm.

Cabe destacar que, aunque en algunas de las rectenas revisadas se han obtenido valores de eficiencia que pueden considerarse bajos, éstas han logrado cosechar energía inalámbrica para energizar dispositivos como relojes digitales [16, 22, 23], LEDs [24,25] y sensores [19, 26, 27], con consumos entre 15 μ W y 40 mW. Estas rectenas fueron probadas en condiciones reales y de laboratorio.

Tabla 1. Eficiencia de conversión máxima de las rectenas.

Sistema	μ (%)	σ (%)	Referencias
GSM/ISM (900 MHz)	46,921	20,119	[15, 24, 28–36]
GSM (1,8 GHz)	26,394	25,710	[16, 17, 34, 35, 37]
UMTS	35,300	13,718	[16, 17]
LTE	57,250	16,961	[16, 38, 39]
WLAN/ISM (2,45 GHz)	51,137	20,151	[16, 19, 26, 30, 35–61]
WLAN/ISM (5,2/5,8 GHz)	58,633	3,272	[20, 55, 62]

Por otro lado, la mayoría de las rectenas que se revisaron (73%) se diseñaron para cosechar la energía de un solo sistema. Sin embargo, otros investigadores realizaron rectenas para la captación de dos sistemas [22, 25, 27, 30, 34, 36–38, 55, 63–70], tres sistemas [15, 35, 71, 72] y cuatro sistemas [16, 29, 73–75], en un 18%, 4% y 5% respectivamente. Este tipo de rectenas busca agrupar en una sola rectena el cosechamiento de energía de varios sistemas de comunicaciones.

Características de las Antenas

En el diseño de las rectenas se han empleado comúnmente varios tipos de antenas, tales como las dipolos y monopolos [5]. Sin embargo, en los últimos años se han implementados otros tipos de antenas. En esta Sección, se analizan las tendencias en el uso de las antenas y en el patrón de radiación obtenido, así como sus valores de ganancia máxima.

Configuración de las Antenas

Las antenas utilizadas en las rectenas diseñadas que se revisaron en los últimos años se clasifican en ocho tipos: corbatín, dipolo, espiral, lazo, monopolo, ranura, vivaldi y yagi-uga (Figura 3). Todas las antenas diseñadas tuvieron una estructura planar o impresa. Cada tipo tiene distintas topologías y formas en el elemento resonante y el plano de referencia o tierra, las cuales son empleadas para adecuar algunos de los parámetros de la antena en función de los requerimientos de la rectena y del sistema.

En la Figura 4(a) se aprecia la cantidad de antenas diseñadas por cada tipo, se evidencia que la más usada es la antena monopolo, con un 66%, dado que presentaron una buena adaptabilidad a todos los sistemas de comunicaciones en RF seleccionados en esta revisión. Posteriormente, les siguen los tipos dipolo (12%) [15, 24,

31, 42, 47, 70, 72, 76-78], ranura (8%) [16, 41, 48, 66, 79, 80], espiral (6%) [52, 53, 69, 81, 82], lazo (4%) [23, 83], corbatín (2%) [35, 84], yagi-uda (1%) [36] y vivaldi (1%) [68]. Por su parte, los arreglos de antenas se han empleado en un 21% de las rectenas revisadas, ordenadas de manera estratégica para mejorar el rendimiento en la captación de las ondas e incrementar la ganancia en las bandas de interés.

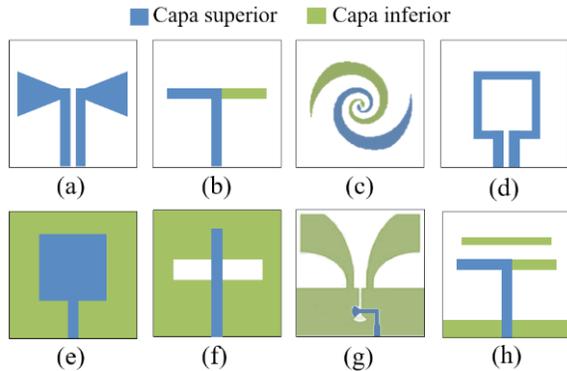


Figura 3. Configuración básica de las antenas empleadas: a) corbatín, b) dipolo, c) espiral, d) lazo, e) monopolo, f) ranura, g) vivaldi y h) yagi-uga.

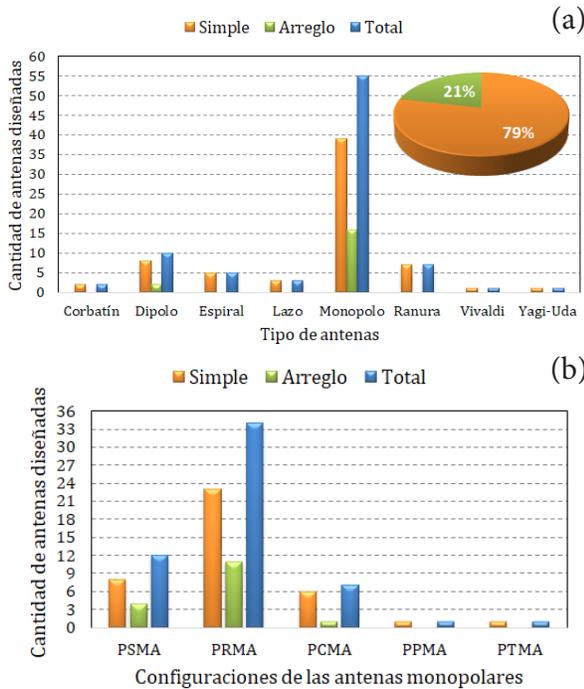


Figura 4. a) Antenas usadas en las rectenas y b) formas de parche de las antenas monopolares.

El tipo de antena de monopolo puede tener varias formas de parche resonante (Figura 4(b)), siendo las más utilizadas las antenas monopolo con forma rectangular (Printed Rectangular MonopoleAntenna, PRMA) [19, 20, 22, 26, 28, 34, 38-40, 43-45, 50, 51, 54, 55, 57, 59-64, 73, 75, 85-93], seguida de las cuadradas (Printed Square Monopole Antenna, PSMA) [18, 38, 67, 71, 94-101], circulares (Printed Circular Monopole Antenna, PCMA) [17, 25, 29, 30, 58, 102, 103], pentagonales (Printed Pentagonal Monopole Antenna, PPMA) [104] y triangulares (Printed Triangular Monopole Antenna, PTMA) [56]. La estructura de la antena se puede modificar insertando ranuras o elementos parásitos para mejorar su rendimiento [105].

En otro orden de ideas, las antenas pueden tener un patrón de radiación omnidireccional o direccional, pero en algunos casos el patrón omnidireccional no es logrado en su totalidad y el resultado obtenido se le denomina cuasi-omnidireccional. En las antenas diseñadas se han obtenido un 27% omnidireccional, un 22% es cuasi-omnidireccional y un 51% direccional. Las antenas del tipo corbatín y lazo presentaron patrones de radiación omnidireccional o cuasi-omnidireccional. En cambio, con el resto de los tipos de antenas se han obtenido comportamientos omnidireccionales y direccionales. Se destaca que la selección del patrón de radiación se realiza por criterio de los autores, que en su mayoría al seleccionar un patrón de radiación direccional buscan obtener un mayor valor de ganancia en la dirección del lóbulo principal, pero no así en el resto de las orientaciones.

Ganancia Máxima

En la Figura 5 se observa la ganancia máxima registrada en las investigaciones revisadas, y clasificada en los distintos tipos de antenas empleadas en las rectenas. Se destaca que para obtener una ganancia máxima superior a 9 dBi se han empleado antenas con patrón de radiación direccional y que estuvieron ordenadas en arreglos de PRMA con 4 elementos [20, 50, 51, 86] y en arreglos de PSMA con 9 elementos [100, 101], obteniendo mejores resultados los primeros. Adicionalmente, se aprecia que la antena espiral [52] presentó el mayor valor de ganancia máxima, igual a 8,89 dBi, entre las antenas sin arreglos, y que para las antenas vivaldi no se reportaron sus valores de ganancia.

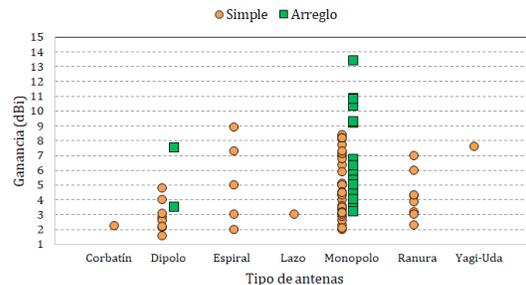


Figura 5. Ganancia máxima de las antenas.

El promedio y la desviación estándar de la ganancia máxima de la antena receptora se registran en la Tabla 2. Las antenas corbatín, lazo y dipolo presentaron valores de ganancia máxima promedio similares e inferiores a los obtenidos con las antenas del tipo ranura, espiral, monopolo y yagi-uda, que prácticamente duplican dichos valores. Para la aplicación de las rectenas, es conveniente que la ganancia de las antenas sea alta para contribuir a una mayor captación de las ondas electromagnéticas. Una técnica relevante para mejorar la ganancia fue la incorporación de una superficie reflectora, denominada superficie selectiva de frecuencia (Frequency Selective Surface, FSS), en la estructura del plano de referencia de la antena. Esta incorporación fue realizada en antenas tipo PRMA, pero fue denominada como RGMS (Reflection Ground Metasurface Structure) en [88] y como PBG (Photonic-Band-Gap) en [60], en las cuales se obtuvo una mejora aproximada de 0,5 dB con respecto a la antena con un plano de referencia sin la superficie indicada.

Tabla 2. Ganancia máxima de los tipos de antenas.

Antena	μ (dBi)	σ (dB)	Referencias
Corbatín	2,250	-	[35]
Dipolo	3,164	1,837	[15, 24, 31, 70, 72, 76–78]
Espiral	5,238	2,878	[52, 53, 69, 82]
Lazo	3,000	-	[23]
Monopolo	5,419	2,629	[17, 18, 20, 22, 26, 28–30, 33, 40, 43–45, 50, 51, 54, 55, 57–64, 71, 75, 85, 86, 88–90, 92, 94, 98–102, 104]
Ranura	4,239	1,569	[16, 41, 66, 80]
Yagi-Uda	7,590	-	[36]

Características de los Rectificadores

El rectificador es un elemento no lineal que sirve para realizar la conversión de energía, que introduce ciertas pérdidas. En este trabajo, se caracterizaron los rectificadores en función de su configuración circuital y la eficiencia conversión RF-DC máxima obtenida.

Configuración de los Rectificadores

Las configuraciones circuitales de los rectificadores se clasificaron en cuatro tipos: diodo en serie, diodo en paralelo, puente de diodos y doblador de voltaje. En la Figura 6, se aprecia la tendencia en la selección del rectificador para las rectenas diseñadas, en donde se evidencia el uso del doblador de voltaje (57,9%), seguido del diodo conectado en serie (26,2%), el diodo en paralelo (10,3%) y el puente de diodos (5,6%). El tipo de diodo utilizado fue el diodo Schottky para señales de RF de la familia de HSMS-28xy.

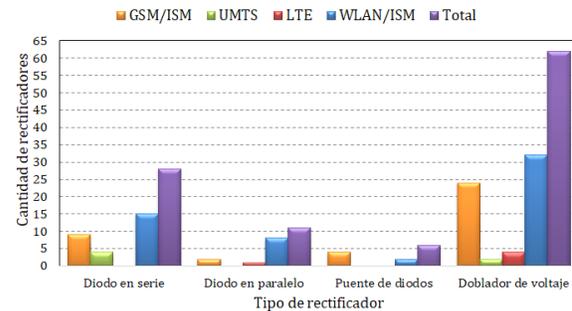


Figura 6. Tipos de rectificadores utilizados en las rectenas por sistema de comunicación.

Es de notar el alto porcentaje en el uso del rectificador del tipo doblador de voltaje en las rectenas realizadas en los últimos años, el cual ha presentado un mejor desempeño que el rectificador con diodo en serie para niveles de potencia superior a 0 dBm [45, 106]. Los dobladores de voltaje se han usado principalmente con una configuración simple de una etapa, los cuales fueron empleados para rectificar una o más bandas. Adicionalmente, se han usado circuitos dobladores de voltaje de varias etapas o con modificaciones en su topología, de las cuales destacan las topologías de Greinacher y de bomba de carga.

Los dobladores de voltaje con topología Greinacher se emplearon para la captación de dos sistemas de comunicaciones en RF [22, 25, 27, 68] y en rectenas con rectificadores que tenían múltiples puertos de entrada [23, 31, 97, 99]. La bomba de carga emplea varias etapas de rectificadores para que los condensadores incrementen el voltaje de salida. Esta topología fue aplicada con dos [84], cuatro [47], cinco [107], seis [82] y siete [72] etapas, detectándose que a medida que aumenta el número de etapas aumenta el voltaje de salida del rectificador, pero a partir de cierta cantidad de etapas ese incremento resulta poco significativo, por lo cual se recomienda optimizar el número de etapas del rectificador, para así evitar la colocación de etapas innecesarias que conllevan a la utilización de más diodos.

En otro orden de ideas, en lo referente al uso de los tipos de rectificadores de acuerdo a los sistemas de comunicaciones en RF, se obtuvo que en el sistema UMTS se han utilizado el diodo en serie [17, 66, 67, 71] y el doblador de voltaje [16, 73]. Mientras que para el sistema LTE, se han empleado las configuraciones de diodo en paralelo [38] y de doblador de voltaje [15, 16, 18, 29]. Los cuatro tipos de configuraciones mencionados han sido usados en los sistemas GSM, GSM y WLAN, como se puede observar en la Figura 6.

Eficiencia de Conversión RF-DC Máxima

En la Figura 7 se visualiza la eficiencia de conversión RF-DC máxima lograda por los rectificadores. Para la configuración de diodo en paralelo se ha obtenido una eficiencia de conversión RF-DC mayor a 54% a partir de 0 dBm [62, 79, 95, 102, 108], mientras que para el puente de diodos se han obtenido valores superiores a 42% a partir de 5 dBm [63, 80, 109, 110], ambas configuraciones presentaron poca desviación estándar. Con respecto al rectificador de diodo en serie [30, 45, 51, 59, 61, 64, 66, 67, 70, 71, 77, 93, 100, 111] y doblador de voltaje [16, 22, 23, 25–28, 34, 39, 45, 57, 58, 68, 69, 73, 98, 101, 110, 112], presentaron una mayor dispersión en la eficiencia obtenida pero tuvieron los máximos valores de eficiencia de conversión RF-DC.

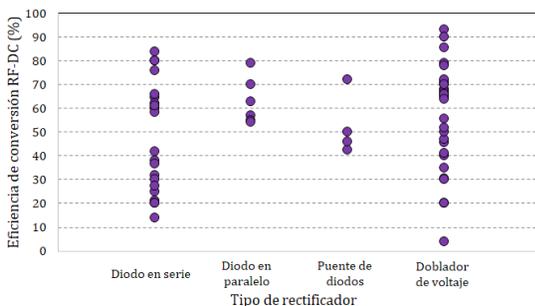


Figura 7. Eficiencia de conversión RF-DC máxima por cada tipo de rectificador.

Con la configuración de diodo en serie se ha obtenido una eficiencia de 42% a 3 dBm mediante la cosecha de GSM a 900 MHz y de UMTS a la vez, e implementando un acoplador de impedancia para cuatro bandas [30]. Además, se ha obtenido un valor máximo de 83,73% cuando la potencia de entrada al rectificador era de 5 dBm [64]. Con el doblador de voltaje se ha requerido menos nivel de potencia de entrada, por ejemplo para conseguir una eficiencia máxima del 47% se precisaron -10 dBm mediante la implementación de una topología de Greinacher [112]. Finalmente, la máxima eficiencia de conversión se obtuvo con un doblador de voltaje con cuatro etapas en paralelo, la cual fue igual a 93% a 10 dBm [16].

Elementos que Mejoran el Rendimiento de las Rectenas

La antena y el rectificador pueden estar interconectados mediante distintos elementos para mejorar el rendimiento del acople entre estas dos etapas. En la Figura 8 se observan las proporciones de los distintos elementos usados en esta interconexión, en la cual solo el 15% de las rectenas diseñadas objeto de la revisión no utilizan ningún elemento interconector. Mientras un 85% emplea algún elemento que puede ser un acoplador de impedancia (60%), un filtro (18%) o ambos (7%).

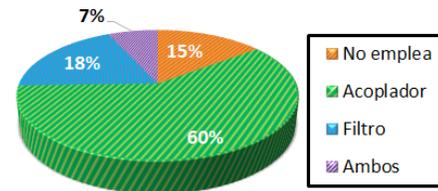


Figura 8. Porcentaje de los elementos usados en la interconexión de las antenas rectificadoras.

La mayoría de los acopladores usados fueron la sección L convencional con cabo en cortocircuito o en circuito abierto. Sin embargo, se han empleado otros acopladores como la sección de resonancia de Foster para mejorar el acoplamiento de multibandas [73], el plano de tierra en lazo (In-Loop Ground Plane, ILGP) para mejorar significativamente el acoplamiento sin incrementar el tamaño de la rectena [23], y las redes de compresión de resistencia (Resistance Compression Networks, RCN) [70] que mejoraron la eficiencia de conversión debido a que minimizan la variación de su resistencia mediante la formación de elementos reactivos.

Con respecto a los filtros, se han implementado para prevenir que las componentes armónicas, las cuales pueden generarse por los elementos no lineales del rectificador, sean re-radiadas a la antena y aumenten las pérdidas por desacoplamiento. Se han usado sus cuatro tipos, es decir, el pasa bajo [26, 38, 45, 47, 51, 56, 64, 72, 85, 88], el pasa alto [17], el pasa banda [24] y el rechaza banda mediante una celda resonante microcinta compacta (Compact Microstrip Resonant Cell, CMRC) para suprimir una banda superior a la de diseño [48]. Cuando se han combinado ambos elementos, se emplea un filtro pasa bajo y un acoplador de impedancia [46, 104] o un filtro pasa banda y un acoplador de impedancia [15] para obtener la mejora que aporta cada elemento.

Adicionalmente, se ha conectado un elemento posterior al rectificador en un 16% de las rectenas, dicho elemento es un convertidor DC-DC [19, 24, 26, 32, 45, 47, 49, 50, 55, 61, 73, 79, 82, 91, 92, 108, 113]. Aunque la eficiencia total de la rectena se ve disminuida por las pérdidas que existen en dicho elemento, éste ayuda a mantener el nivel de tensión que se le aplica a la carga.

Conclusiones

Se concluye que existe una variedad en los criterios de diseño de las rectenas para una aplicación dada y múltiples combinaciones de los tipos de elementos empleados en las etapas de la rectena. De esta manera, se sugiere establecer criterios para cada aplicación que

permitan obtener el mejor rendimiento posible, optimizar las etapas de las rectenas para obtener una mayor eficiencia de conversión y cosechar más energía electromagnética mediante la recepción de varias bandas de manera simultánea.

En la revisión realizada se determinó que las rectenas se han diseñado principalmente para captar un solo sistema de comunicación en RF, donde se destacan los sistemas WLAN y GSM como los más usados. La antena que presentó una mejor adaptabilidad a todos los sistemas de comunicaciones en RF fue la configuración de monopolo con parche rectangular. La configuración del rectificador que ha tenido la mayor eficiencia de conversión RF-DC fue el doblador de voltaje, seguido del rectificador de diodo en serie. Adicionalmente, para mejorar el rendimiento del acople entre estas dos etapas se han empleado distintos elementos, destacando el uso del acoplador de impedancia de sección L convencional y los filtros.

Referencias Bibliográficas

- [1] Matin, M.: "Wireless Sensor Networks-Technology and protocols", InTech, Rijeki, 2012.
- [2] Huang, X., Chen, Y., and Ao, S.: "Advances in communication systems and electrical engineering", Springer, New York, 2008.
- [3] Bi, Q., Zysman, G. I., and Menkes, H.: "Wireless Mobile Communications at the Start of the 21st Century". IEEE Communication Magazine, Vol. 39, N° 1, (2001) 110-116.
- [4] Sanou, B.: "ICT Facts & Figures". International Telecommunication Union, Geneva, 2015.
- [5] Zhang, J., and Huang, Y.: "Rectennas for Wireless Energy Harvesting". In: IEEE Student Conference on Research and Development (SCoReD), Kuala Lumpur (2016), 1-4.
- [6] Shoki, B. H.: "Issues and Initiatives for Practical Deployment of Wireless Power Transfer Technologies in Japan". Proc. IEEE, Vol. 101, N° 6, (2013) 1312-1320.
- [7] Ahn, D., and Hong, S.: "A transmitter or a receiver consisting of two strongly-coupled resonators for enhanced resonant coupling in wireless power transfer". IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 61, N° 3, (2013) 1193-1203.
- [8] Matias, R., Cunha, B., and Martins, R.: "Modeling inductive coupling for wireless power transfer to integrated circuits". IEEE Wirel. Power Transf, Vol. 2, N° 1, (2013) 198-201.
- [9] Dai, J., and Ludois, D. C.: "A survey of wireless power transfer and a critical comparison of inductive and capacitive coupling for small gap applications". IEEE Trans. Power Electron., Vol. 30, N° 11, (2015) 6017-6029.
- [10] Song C. Song, Chiuk, K., Hongseok, K., Sunkyu, J., Young, I., and Kim, J.: "Structure of handheld resonant magnetic coupling charger (HH-RMCC) for electric vehicle considering electromagnetic field". IEEE Wirel. Power Transf., Vol. 2013, (2013) 131-134.
- [11] Shinohara, N.: "Rectennas for microwave power transmission". IEICE Electron. Express, Vol. 10, N° 21, (2013) 1-13.
- [12] Donchev, E., Pang, J., Gammon, P., Centeno, A., Xie, F., Petrov, P., Breeze, J., Ryan, M., Riley, D., and Alford, N.: "The rectenna device: From theory to practice (a review)". MRS Energy Sustain. - A Rev. J., Vol. 1, (2014) 1-34.
- [13] Nasimuddin, "Microstrip antennas": InTech, Rijeka, 2011.
- [14] Sorrentino R., and Bianchi, G.: "Microwave and RF engineering", John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2010.
- [15] Song, C., Huang, Y., Zhou, J., and Carter, P.: "Improved Ultra-Wideband Rectennas Using Hybrid Resistance Compression Technique". IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 65, N° 4, (2017) 2057-2062.
- [16] Benayad A., and Tellache, M.: "A compact energy harvesting multiband rectenna based on metamaterial complementary split ring resonator antenna and modified hybrid junction ring rectifier". Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng., Vol. 2019, (2019) 1-11.
- [17] Khemar, A., Kacha, A., Takhedmit, H., and Abib, G.: "Design and experiments of a dual-band rectenna for ambient RF energy harvesting in urban environments". IET Microwaves, Antennas Propag., Vol. 12, N° 1, (2018) 49-55.
- [18] Shi, Y., Fan, Y., Li, Y., Yang, L., and Wang, M.: "An Efficient Broadband Slotted Rectenna for Wireless Power Transfer at LTE Band". IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 67, N° 2, (2018) 814-822.
- [19] Takhedmit, H.: "Ambient RF Power Harvesting. Application to Remote Supply of a Batteryless Temperature Sensor". In: IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), Trento (2016), 1-4.
- [20] Nguyen, N., Bui, T., Le, A., Pham, A., Nguyen, T., Nguyen, C., Le, M.: "A Novel Wideband Circularly Polarized Antenna for RF Energy Harvesting in Wireless Sensor Nodes". Int. J. Antennas Propag., Vol. 2018, (2018) 3-9.

- [21] ITU: "Measuring the Information. Society Report, vol. 1", ITU Publications, Geneva, 2018.
- [22] Zeng, M., Li, Z., Andrenko, A., Zeng, Y., and Tan, H.: "A Compact Dual-Band Rectenna for GSM900 and GSM1800 Energy Harvesting". *Int. J. Antennas Propag.*, Vol. 2018, (2018) 1–10.
- [23] Zeng, M., Andrenko, A., Liu, X., Li, Z., Tan, H.: "A Compact Fractal Loop Rectenna for RF Energy Harvesting". *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, Vol. 16, (2017) 2424–2427.
- [24] Okba, A., Takacs, A., and Aubert, H.: "Compact Rectennas for Ultra-Low-Power Wireless Transmission Applications". *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 67, N° 5, (2019) 1697–1707.
- [25] Chandravanshi S., and Akhtar, M.: "An efficient dual-band rectenna using symmetrical rectifying circuit and slotted monopole antenna array". *Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng.*, Vol. 2020 (2020), 1–15.
- [26] Contreras, A., Steinfeld, L., Siniscalchi, M., Schandy, J., and Rodríguez, B.: "A Rectenna as Energy Source for Wireless Sensor Nodes". In *11st IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems (LASCAS)*, San José (2020), 1–4.
- [27] Nimo, A., Beckedahl, T., Ostertag, T., and Reindl, L.: "Analysis of Passive RF-DC Power Rectification and Harvesting Wireless RF Energy for Micro-watt Sensors". *AIMS Energy*, Vol. 3, N° 2, (2015) 184–200.
- [28] Singh, M., Agrawal, S., and Parihar, M.: "Design of a rectenna system for GSM-900 band using novel broadside 2x1 array antenna". *IET J. Eng.*, Vol. 1, N° 1, (2017) 1–5.
- [29] Agrawal, S., Parihar, M. S., and Kondekar, P. N.: "Broadband Rectenna for Radio Frequency Energy Harvesting Application Broadband Rectenna for Radio Frequency Energy Harvesting Application". *IETE J. Res.*, Vol. 64, N° 3, (2018) 347–353.
- [30] Agrawal, S., Parihar, M., and Kondekar, P. N.: "A quad-band antenna for multi-band radio frequency energy harvesting circuit". *Int. J. Electron. Commun.*, Vol. 85, (2018) 99–107.
- [31] Asif, S. M., Iftikhar, A., Hansen, J. W., Khan, M., Ewert, D., and Braaten, B.: "A Novel RF-Powered Wireless Pacing via a rectenna-based Pacemaker and a Wearable Transmit-Antenna Array". *IEEE Access*, Vol. 7, (2018) 1139–1148.
- [32] Baranov, A. A., Akbari, S., Bragar, A., and Karelin, A.: "Feasibility of RF Energy Harvesting for Wireless Gas Sensor Nodes". *Sensors Actuators A. Phys.*, Vol. 275, N° 1, (2018) 37–43.
- [33] Chandravanshi S., and Akhtar, M.: "Design of efficient rectifier using IDC and harmonic rejection filter in GSM/CDMA band for RF energy harvesting". *Microw. Opt. Technol. Lett.*, Vol. 59, N° 3, (2017) 681–686.
- [34] Ho, D., Kharrat, I., Vuong, Nguyen, Q., and Le, M.: "Dual-Band Rectenna for Ambient RF Energy Harvesting at GSM 900 MHz and 1800 MHz". In *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET) Dual-Band*, Hanoi (2016), 306–310.
- [35] Lopez-yela A., and Segovia-Vargas, D.: "A Triple-Band Bow-Tie Rectenna for RF Energy Harvesting without Matching Network". In *IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, Taipei (2017), 1–4.
- [36] Scheeler R., and Korhummel, S.: "A Dual-Frequency Ultralow-Power Efficient 0.5-g Rectenna". *IEEE Microw. Mag.*, Vol. 15, N° 1, (2014) 109–114.
- [37] Sampe, J., Hidayah, N., Yunus, M., Yunas, J., and Pawi, A.: "Ultra-Low Power RF Energy Harvesting of 1.9GHz & 2.45GHz Narrow-Band Rectenna for Battery-Less Remote Control". *Int. J. Inf. Electron. Eng.*, Vol. 7, N° 3, (2017) 118–122.
- [38] Malisuwan, S., Tiamnara, N., and Suriyakrai, N.: "Design of Antennas for a Rectenna System of Wireless Power Transfer in the LTE/WLAN Frequency Band". *J. Clean Energy Technol.*, Vol. 5, N° 1, (2017) 42–46.
- [39] Shi, Y., Fan, Y., Jing, J., Yang, L., Li, Y., and Wang, M.: "An efficient fractal rectenna for RF energy harvest at 2.45 GHz ISM band". *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.*, Vol. 28, N° 9, (2018) 1–8.
- [40] Ahmed, S., Zakaria, Z., Husain, M. N., and Alhegazi, A.: "Design of Rectifying Circuit and Harmonic Suppression Antenna for RF Energy Harvesting". *J. Telecommun. Electron. Comput. Eng.*, Vol. 9, N° 2, (2017) 63–67.
- [41] Ahmed, S., Zakaria, Z., Husain, Ibrahim, I., and Alhegazi, A.: "Efficient feeding geometries for rectenna design at 2.45 GHz". *Electron. Lett.*, Vol. 53, N° 24, (2017) 24–25.
- [42] Chen Y., and Chiu, C.: "Maximum Achievable Power Conversion Efficiency Obtained through an Optimized Rectenna Structure for RF Energy Harvesting". *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 65, N° 5, (2017) 2305–2317.
- [43] Chuma, E. L., De Torre, L., Iano, Y., and Roger, L.: "A Compact Fractal Structure Based Rectenna with the Rectifier Circuit Integrated". In *IEEE Int. Symposium on Antennas and Propag. & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego (2017), 1607–1608.

- [44] Chuma, E., Rodriguez, L., Iano, Y., Bravo, L., and Sanchez, M.: "Compact rectenna based on a fractal geometry with a high conversion energy efficiency per area". *IET Microwaves, Antennas Propag. Res.*, Vol. 12, N° 2, (2018) 173–178.
- [45] Contreras, A., Rodríguez, B., Steinfeld, L., Schandy, J., and Siniscalchi, M.: "Design of a Rectenna for Energy Harvesting on Wi-Fi at 2.45 GHz". In *2nd Argentine Conference on Electronics (CAE)*, Buenos Aires (2020), 63–68.
- [46] Deng, C., Huang, K., Wu, Y., and Xia, M.: "Analysis of RF-DC Conversion Efficiency of Composite Multi-Antenna Rectifiers for Wireless Power Transfer". *KSI Trans. Internet Inf. Syst.*, Vol. 11, N° 10, (2017) 5116–5131.
- [47] Fan, S., Zhao, Y., Gou, W., Song, C., Huang, Y., Zhou, J., Geng, L.: "A High-Efficiency Radio Frequency Rectifier-Booster Regulator for Ambient WLAN Energy Harvesting Applications". In *IEEE MTT-S International Wireless Symposium*, Chengdu (2018), 1–3.
- [48] Kang, Z., Lin, X., Tang, C., Mei, P., Liu, W., and Fan, Y.: "2.45-GHz wideband harmonic rejection rectenna for wireless power transfer". *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, Vol. 9, N° 5, (2017) 977–983.
- [49] Kumar D., and Chaudhary, K.: "High Efficiency Harmonic Harvester Rectenna for Energy Storage Application". *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, Vol. 9, N° 1, (2018) 252–259.
- [50] Lee, D., Lee, S., Hwang, I., and Lee, W.: "Hybrid Power Combining Rectenna Array for Wide Incident Angle Coverage in RF Energy Transfer". *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 65, N° 9, (2017) 3409–3418.
- [51] Li, X., Yang, L., and Huang, L.: "Novel Design of 2.45-GHz Rectenna Element and Array for Wireless Power Transmission". *IEEE Access*, Vol. 7, (2019) 28356–28362.
- [52] Mansour, M., Takiguchi, O., Inoi, T., and Kanaya, H.: "Experimental Investigation of Wireless Energy Harvesting with a Bluetooth Low Energy Sensing Unit". In *International Conference on Electronics Packaging and iMAPS*, Mie (2018), 189–193.
- [53] Mansour, M., Polozec, X., and Kanaya, H.: "Enhanced Broadband RF Differential Rectifier Integrated with Archimedean Spiral Antenna for Wireless Energy Harvesting Applications". *Sensors*, Vol. 19, N° 655, (2019) 1–13.
- [54] Meor, M., Zakaria, Z., Husain, M. N., and Misran, M. H.: "A High-Efficiency Rectenna Design at 2.45 GHz for RF Energy Scavenging". *J. Telecommun. Electron. Comput. Eng.*, Vol. 9, N° 3, (2017) 151–154.
- [55] Naresh, B., Singh, V., and Bhargavi, V.: "Dual band RF Energy Harvester for Wearable Electronic Technology". In *3rd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics*, Chennai (2017), 3–6.
- [56] Peter, T., Rahman, T., Cheung, S., Nilavalan, R., Abutarboush, H., and Vilches, A.: "A novel transparent UWB antenna for photovoltaic solar panel integration and RF energy harvesting". *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 62, N° 4, (2014) 1844–1853.
- [57] Shi, Y., Jing, J., Fan, Y., Yang, L., and Wang, M.: "A novel compact broadband rectenna for ambient RF energy harvesting". *Int. J. Electron. Commun.*, Vol. 95, (2018) 264–270.
- [58] Wang, M., Yang, L., Fan, Y., Shen, M., Li, Y., and Shi, Y.: "A compact omnidirectional dual-circular rectenna for 2.45 GHz wireless power transfer". *Int. J. RF Microwave. Comput. Aided Eng.*, Vol. 2018, (2018) 1–7.
- [59] Zhang, Y., Shen, S., Chiu, C., and Murch, R.: "Hybrid RF-Solar Energy Harvesting Systems Utilizing Transparent Multiport Micromeshed Antennas". *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 67, N° 11, (2019) 4534–4546.
- [60] Ji, S., Qi, H., and Zhang, H.: "Rectenna Serves 2.45-GHz". *Wireless Power Transmission. Microw. RF*, Vol. 2014, N° September, (2014) 102–105.
- [61] Adami, S., Proynov, P., Hilton, G., Yang, G., Zhang, C., Beeby, S., Craddock, I., Stark, B.: "A Flexible 2.45-GHz Power Harvesting Wristband With Net System Output From –24.3 dBm of RF Power". *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 66, N° 1, (2018) 380–395.
- [62] Lu, P., Yang, Y., Cheng, F., and Wu, L.: "Frequency-Reconfigurable Rectenna With an Adaptive Matching Stub for Microwave Power Transmission". *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, Vol. 18, N° 5, (2019) 956–960.
- [63] Ghosh S., and Chakrabarty, A.: "Green Energy Harvesting from Ambient RF Radiation". In *International Conference on Microelectronics, Computing and Communications (MicroCom)*, Durgapur (2016), 1–4.
- [64] Indumathi G., and Karthika, K.: "Rectenna Design for RF Energy Harvesting in Wireless Sensor Networks". In *IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, Coimbatore (2015), 9–12.
- [65] Khemar, A., Kacha, A., Takhedmit, H., and Abib, G.: "Design and experiments of a 3G-band rectenna for radio frequency energy harvesting". *Rev. Roum. Sci.*

- Techn.-Électrotechn. Énerg., Vol. 62, N° 1, (2017) 82–86.
- [66] Palazzi, V., Hester, J., Bito, J., Alimenti, F., Kalialakis, C., Collado, A., Mezzanotte, P., Georgiadis, A., Roselli, L., Tentzeris, M.: "A Novel Ultra-Lightweight Multiband Rectenna on Paper for RF Energy Harvesting in the Next Generation LTE Bands". *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 66, N° 1, (2018) 366–379.
- [67] Shen, S., Chiu, C., and Murch, R.: "A Broadband L-Probe Microstrip Patch Rectenna for Ambient RF Energy Harvesting". In *Int. Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego (2017)*, 2037–2038.
- [68] Song, S., Su, M., Liu, Y., Li, S., and Tang, B.: "A Novel Broadband Rectenna for Energy Harvesting". In *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Okinawa (2016)*, 1082–1083.
- [69] Tissier J., and Latrach, M.: "Broadband Rectenna for Ambient RF Energy Harvesting Applications". In *32nd URSI GASS, Montreal (2017)*, 2–4.
- [70] Georgiadis, A., Collado, A., and Niotaki, K.: "Rectenna Design and Signal Optimization for Electromagnetic Energy Harvesting and Wireless Power Transfer". *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E98.C, N° 7, (2015) 608–612.
- [71] Shen, S., Chiu, C., and Murch, R. D.: "A Dual-Port Triple-Band L-Probe Microstrip Patch Rectenna for Ambient RF Energy Harvesting". *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, Vol. 16, (2017) 3071–3074.
- [72] Singh, B., Ghosh, S., and Chakrabarti, S.: "Design Optimization and Implementation of Multiband Rectenna for Efficient Radio Frequency Energy Harvesting". In *IEEE International Conference on Industrial and Information Systems, Peradeniya (2017)*, 1–6.
- [73] Abdeltawab A. M., and Khattab, A.: "Efficient Multi-Band Energy Harvesting Circuit for Wireless Sensor Nodes". In *Fourth International Japan-Egypt Conference on Electronics, Communications and Computers (JEC-ECC), Cairo (2016)*, 75–78.
- [74] Chen Y., and Chiu, C.: "Characterization of the Lossyness of Matching Networks for RF Energy-Harvesting Rectennas". In *11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris (2017)*, 2053–2056.
- [75] Elsheakh, D. N.: "Broadband dual linear polarized (DLP antenna array for energy harvesting system". *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, Vol. 2019, (2019) 1–7.
- [76] Mitani, T., Kawashima, S., and Nishimura, T.: "Analysis of Voltage Doubler Behavior of 2.45-GHz Voltage Doubler-Type Rectenna". *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 65, N° 4, (2017) 1051–1057.
- [77] Okba, A., Takacs, A., and Aubert, H.: "900 MHz Miniaturized Rectenna". In *IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), Montreal (2018)*, 1–4.
- [78] Contreras, A., y Briceño, M.: "Propuesta de una antena para la medición de campos electromagnéticos en las bandas L y S de microondas". In *XIII Spanish-Portuguese Conference on Electrical Engineering, Valencia (2013)*, 1–5.
- [79] Eid, A., Costantine, J., Tawk, Y., Ramadan, A., Abdallah, M., Elhadj, R., Awad, R., Kasbah, I.: "An efficient RF energy harvesting system". In *11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris (2017)*, 896–899.
- [80] Ghosh, S.: "Design and testing of rectifying antenna for RF energy scavenging in GSM 900 band". *Int. J. Comput. Appl.*, Vol. 39, N° 1, (2017) 36–44.
- [81] Alex-Amor, A., Padilla, P., Fernandez, J., and Sierra-Castañer, M.: "A miniaturized ultrawideband Archimedean spiral antenna for low-power sensor applications in energy harvesting". *Microw. Opt. Technol. Lett.*, Vol. 2018, N° May, (2018) 1–6.
- [82] Randa, M., Maha, A., Menna, A., Farag, M., Ahmed, E., Hammad, H., and Abdel-hamid, A.: "A Foldable Textile-based Broadband Archimedean Spiral Rectenna for RF Energy Harvesting". In *16th Mediterranean Microwave Symposium, Abu Dhabi (2016)*, 1–4.
- [83] Visser, H. J.: "Miniature Rectenna Design". In *International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - Italy (ACES), Firenze (2017)*, 1–2.
- [84] Salsabila S., and Munir, A.: "1.8GHz Printed Bow-Tie Dipole Rectenna with Voltage Quadrupler for RF Energy Harvesting". In *Proc. IEEE Region 10 Conference (TENCON), Malaysia (2017)*, 2739–2742.
- [85] Amir, N., Hamzah, S., Ramli, K., Mohd, S., Shamian, M., Adon, N., and Noordini, N.: "A 2×1 Microstrip Patch Array Rectenna with Harmonic Suppression Capability for Energy Harvesting Application". *Comput. Sci. Technol.*, Vol. 603, (2020) 373–382.
- [86] Trad, J. J., Zeb, B. A., Esselle, K. P., and Afzal, M. U.: "Preliminary Investigations into a Simple and Effective Rectenna for RF Energy Harvesting". In *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego (2017)*, 1095–1096.

- [87] Deepa S. N., and Swarupa, B.: "RF Energy Harvesting Using 900MHz of Mobile Signal Frequency to Charging the Mobile Battery". In IEEE International Conference on Innovations in Green Energy and Healthcare Technologies, Incheon (2017), 1-5.
- [88] Liu, R., Wang, X., Nie, D., Wang, L., Wang, M., Zheng, H., and Li, E.: "Metasurface: Enhancing gain of antenna and energy harvesting system design". *Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng.*, Vol. 2019, (2019) 1-11.
- [89] Mathur, M., Agrawal, A., Singh, G., and Bhatnagar, S. K.: "A Compact Coplanar Waveguide Fed Wideband Monopole Antenna for RF Energy Harvesting Applications". *Prog. Electromagn. Res. M*, Vol. 63, (2018) 175-184.
- [90] Mishra, S., Varavadekar, J., and Haldankar, S.: "Design of Rectenna for Energy Harvesting in ISM Band". In International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, Coimbatore (2017), 359-362.
- [91] Partal, H. P., and Partal, S. Z.: "Design and Implementation of a RF Energy Harvesting Module with DC Power Control". In 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON), Poznan (2018), 33-36.
- [92] Partal, H. P., Belen, M. A., and Partal, S.: "Design and realization of an ultra-low power sensing RF energy harvesting module with its RF and DC sub-components". *Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng.*, Vol. 2019, (2019) 1-12.
- [93] Shen, S., Chiu, C., and Murch, R. D.: "Optimization of 2.45-GHz Pixel Rectenna for Wireless Power Transmission using Mixed Integer Linear Programming". In IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego (2017), 351-352.
- [94] Singh, N., Kanaujia, B., Beg, M., Kumar, S., and Khan, T.: "A Dual Polarized Multiband Rectenna for RF Energy Harvesting". *Int. J. Electron. Commun.*, Vol. 93, (2018) 123-131.
- [95] Sun H., and Geyi, W.: "A New Rectenna Using Beamwidth-Enhanced Antenna Array for RF Power Harvesting Applications". *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, Vol. 16, (2016) 1451-1454.
- [96] Aljaloud K., and Tong, K.: "A Compact Rectenna Using Split Ring Resonator for Energy Harvesting". In International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition, London (2017), 164-165.
- [97] Bjorkqvist, O., Kolitsidas, C. I., Dahlberg, O., Silver, G., and Mattsson, M.: "A Novel Efficient Multiple Input Single Output RF Energy Harvesting Rectification Scheme". In IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego (2017), 1605-1606.
- [98] Lee, D., Khang, S., Chae, S., and Yu, J.: "Dual linear polarized cavity-backed patch rectenna with DC power management network for optimized wireless RF power transfer". *Microw. Opt. Technol. Lett.*, Vol. 60, N° 3, (2018) 713-717.
- [99] Mattsson, M., Kolitsidas, C., Silver, G., Bj, O., Dahlberg, O., and Jonsson, B.: "A high gain Dual-Polarised Differential Rectenna for RF Energy Harvesting". In IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego (2017), 1609-1610.
- [100] Sennouni, M., Zbitou, J., Abboud, B., Tribak, A., and Latrach, M.: "Efficient rectenna design incorporating new circularly polarized antenna array for wireless power transmission at 2.45GHz". International Renewable and Sustainable Energy Conference, Ouarzazate (2014), 577-581.
- [101] Sennouni, M. A., Zbitou, J., and Abboud, B.: "Improved Circularly Polarized Rectenna Design for Microwave Power Transmission at 2.45GHz". In International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Ouarzazate (2014), 1-5.
- [102] Huang, Y., Shinohara, N., and Toromura, H.: "A Wideband Rectenna for 2.4 GHz-band RF Energy Harvesting". In IEEE Wireless Power Transfer Conference, Aveiro (2016), 1-3.
- [103] Naqvi S. A., and Khan, M.: "Design of a miniaturized frequency reconfigurable antenna for rectenna in WiMAX and ISM frequency bands". *Microw. Opt. Technol. Lett.*, Vol. 60, N° 2, (2018) 325-330.
- [104] Gangwar D., and Yadava, R.: "Design and analysis of a pentagonal rectenna". In Int. Conference on Signal Processing and Integrated Networks, Noida (2014), 654-658.
- [105] Contreras, A., y Urdaneta, M.: "Antenas de banda ultra ancha para sistemas de comunicaciones en las bandas de microondas: Una revisión". *Rev. Ing. UC*, Vol. 25, N° 2, (2018) 134-148.
- [106] Anuroop, Gangwar, D., and Yadava, R.: "Design and analysis of a pentagonal rectenna". In Int. Conference on Signal Processing and Integrated Networks, Noida (2014), 654-658.
- [107] Shahabuddin, A. A., Shalu, P. D., and Akter, N.: "Optimized Process Design of RF Energy Harvesting Circuit for Low Power Devices". *Int. J. Appl. Eng. Res.*, Vol. 13, N° 2, (2018) 849-854.
- [108] Huang, Y., Shinohara, N., and Mitani, T.: "A Constant

- Efficiency of Rectifying Circuit in an Extremely Wide Load Range". *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 62, N° 4, (2014) 986–993.
- [109] Kundu, P, Acharjee, J, and Mandal, K.: "Design of an Efficient Rectifier Circuit for RF Energy Harvesting System". *Int. J. Adv. Eng. Manag.*, Vol. 2, N° 4, (2017) 94–97.
- [110] Rengalakshmi P, and Brinda, R.: "Rectifier for RF Energy Harvesting". *Int. J. Comput. Appl.*, Vol. 143, N° 10, (2016) 14–17.
- [111] Zulkifli, F, Leza, Y, Basari, and Rahardjo, E.: "Design of rectifier for rectenna application". In *Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Nanjing (2015), 7–9.
- [112] Hu, Y, Xu, H, Sun, H., and Sun, S.: "A High-Gain Rectenna Based on Grid-Array Antenna for RF Power Harvesting Applications". In *10th Global Symposium on Millimeter-Waves*, Hong Kong (2017), 161–162.
- [113] Ababneh, M. M., Perez, S., and Thomas, S.: "Optimized power management circuit for RF energy harvesting system". In *IEEE 18th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, Cocoa beach (2017), 1–4.



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Vol. 43. N°2, Mayo -Agosto 2020, pp. 58 - 110 _____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en Abril de 2020, por el **Fondo Editorial Serbiluz**, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve

www.serbi.luz.edu.ve

www.produccioncientifica.luz.edu.ve