



Rectenna de doble banda para la captación de energía inalámbrica en las bandas de 2.40 GHz y 5.38 GHz

Dual Band Rectenna for Wireless Energy Harvesting in the 2.40 GHz and 5.38 GHz

  Edison Andrés Zapata Ochoa ¹;
 Francisco López Giraldo ²;
 Germán David Góez ³

¹ Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín-Colombia,
edisonzapata110337@correo.itm.edu.co
² Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín-Colombia,
franciscolopez@itm.edu.co
³ Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín-Colombia,
germangoez@itm.edu.co

Cómo citar / How to cite

E. A. Zapata-Ochoa, F. López-Giraldo; G. D. Góez, "Rectenna de doble banda para la captación de energía inalámbrica en las bandas de 2.40 GHz y 5.38 GHz," *TecnoLógicas*, vol. 25, nro. 55, e2384, 2022.
<https://doi.org/10.22430/22565337.2384>

Resumen

El objetivo de este estudio, plasmado en este documento, fue implementar una rectenna para aplicaciones de área local inalámbrica 2.45 GHz y 5.38 GHz. Para ello, se estableció que las dimensiones de la antena fueran de 18 mm × 44 mm, la cual se simula mediante el software de optimización CST Studio, fabricada en sustrato FR4 con grosor de 1.6 mm, donde el material conductor posee un espesor de 0.035 mm. Asimismo, se utilizó la técnica de ranuras rectangulares para mejorar el ancho de banda de la antena; esta técnica consiste en insertar ranuras en la estructura con el fin de modificar el desplazamiento de la corriente de superficie. Lo anterior presentó una ganancia de 2.49 dB en la frecuencia de 2.45 GHz y de 4.01 dB en la frecuencia de 5.38 GHz. La antena propuesta para aplicaciones de recolección de energía de RF exhibe un patrón de radiación tipo dipolo, el cual mejora la captura de energía de RF desde varias direcciones. El rectificador de triple banda ranurada con red de adaptación de impedancia en forma de T se diseñó en FR4, utilizando un diodo Schotkky HSMS-286C para el cambio de control de RF AC a DC. Como fuente emisora de RF se empleó un enrutador inalámbrico tp-link TL-WR940N a una distancia de 30 cm de separación entre este y la rectenna propuesta. La salida de corriente continua de la rectenna es de 3 voltios con una potencia de señal generada de 20 dBm a 2.4 GHz. La rectenna de bajo coste puede ser utilizada para aplicaciones de carga de energía en sistemas de la internet de las cosas (IoT).

Palabras clave

Antenas microcinta, circuito rectificador, red de área local inalámbrica, transmisión inalámbrica de energía, Wi-Fi.

Abstract

The objective of this study, reflected in this document, was to implement a rectenna for 2.45 GHz and 5.38 GHz wireless local area applications. For this purpose, the antenna dimensions were set to 18 mm × 44 mm, which is simulated using the optimization software CST Studio, manufactured on FR4 substrate with a thickness of 1.6 mm, where the conductive material has a thickness of 0.035 mm. Likewise, the rectangular slot technique was used to improve the bandwidth of the antenna; this technique consists of inserting slots in the structure to modify the displacement of the surface current. The above presented a gain of 2.49 dB at the 2.45 GHz frequency and 4.01 dB at the 5.38 GHz frequency. The proposed antenna for RF energy harvesting applications exhibits a dipole type radiation pattern, which enhances the capture of RF energy from various directions. The triple slotted-band rectifier with T-shaped impedance matching network was designed in FR4, using a Schotkky HSMS-286C diode for AC to DC RF control switching. A tp-link TL-WR940N wireless router was used as the RF emitting source at 30 cm separation between it and the proposed rectenna. The DC output of the rectenna is 3 volts with a generated signal power of 20 dBm at 2.4 GHz. The low-cost rectenna can be used for power-charging applications in the Internet of things (IoT) systems.

Keywords

Microstrip antenna, converter rectifier, wireless local area network, wireless power transfer, Wi-Fi.

1. INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones donde se incluyen redes de sensores inalámbricos, dispositivos autoalimentados e internet de las cosas (IoT), tienen la necesidad de recolectar energía para así, dar solución a problemas de carga, el mantenimiento en los sistemas de baterías y también para reducir el uso de estas ya que, contaminan el ambiente [1]. En el medio ambiente se encuentran fuentes de energía que pueden suplir necesidades de carga elementales como la energía solar (100 mW/cm^2), energía por vibración ($200 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$), energía térmica ($60 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$) y la energía de radio frecuencia (RF) ($1 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$) [2]. También se puede reciclar la energía electromagnética proveniente de la televisión digital [3], [4] las estaciones móviles [5]-[7] y las señales de Wi-Fi [8], [9]. Las antenas con patrón de radiación omnidireccional son de gran utilidad para mejorar el sistema WPT (Wireless Power Transfer, por sus siglas en inglés) ya que la antena captura energía de varias direcciones, igualmente es necesario un circuito rectificador para realizar la conversión de energía RF (Radio Frequency, por sus siglas en inglés) a corriente continua (CC), la combinación de una antena y un circuito rectificador se conoce como Rectenna [10]-[12]. La integración de estos dos elementos es fundamental para dicho sistema debido a que, determina la calidad y la eficiencia de un sistema recolector de energía RF [13]. La Figura 1 presenta el diagrama de bloques de un sistema recolector de energía RF.

En la literatura consultada se han encontrado algunas antenas multibanda para la recolección de energía de RF [14]-[17] sin embargo, el diseño y fabricación de algunas de estas antenas es complejo. Para tener una buena eficiencia de conversión de potencia de entrada es ideal que un sistema de WPT tenga varias frecuencias de resonancia porque los niveles de potencia recogidos son bajos así, múltiples frecuencias aportan energía al sistema. Con relación a lo anterior, se encuentra una antena multibanda que opera a seis frecuencias de resonancia, consiste de un parche cuadrado de esquina truncada cargado con varias ranuras circulares, ranuras en L y ranuras en U, logrando una eficiencia de conversión máxima del 84 % a 5.76 GHz para la banda C es propuesta en [18].

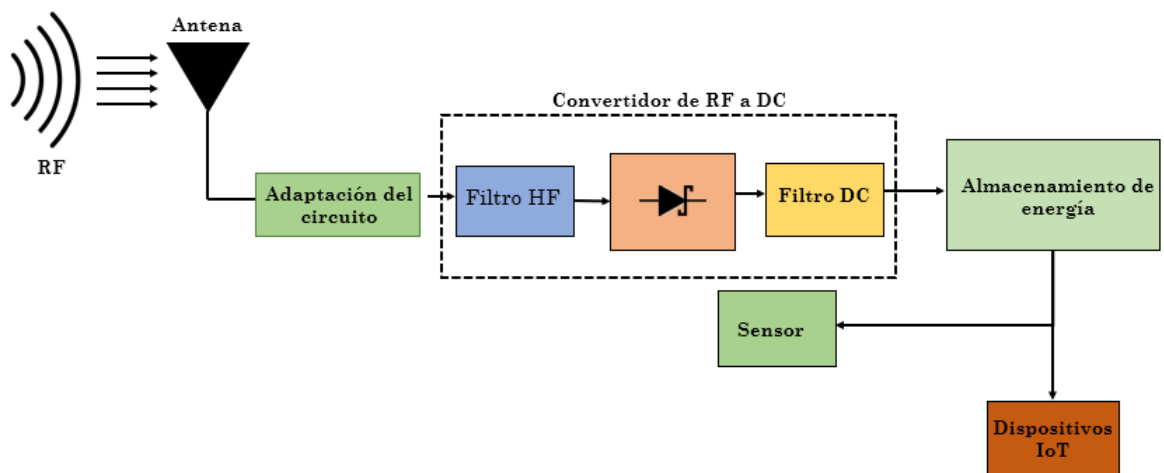


Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema recolector de energía RF. Fuente: Elaboración propia.

En [19], se implementa una antena multibanda para recolectar energía de las frecuencias de las bandas utilizadas en telefonía móvil GSM 900 MHz, 1800 MHz y 2.45 GHz, con una

ganancia máxima aproximada de 7 dB para 2.46 GHz, 6 dB para 1.78 GHz, y 3 dB para 900 MHz, además se diseña un circuito rectificador multietapa con diodos Schottky para mejorar la vida útil de la batería. Estos diseños han tratado de minimizar los tamaños de las antenas y de los circuitos rectificadores procurando mantener la calidad de multibanda.

En este documento se presenta una rectenna sencilla de bajo costo y de fácil construcción, empleando ranuras para ajustar el ancho de banda y las frecuencias de operación para captar energía RF en el rango de Wi-Fi.

2. METODOLOGÍA

La antena propuesta está fabricada sobre un sustrato FR4 de bajo costo con una permitividad relativa (ϵ_r) de 4.4, tangente de pérdida de 0.02 y un espesor (h) de 1.6 mm. El tamaño total de sustrato es de 18 mm \times 44 mm, con frecuencias de resonancia en 2.45 GHz, 5.38 GHz. La línea de alimentación se realiza por medio de una guía de onda coplanar (CPW) con impedancia de 50 Ω , esta línea de transmisión es utilizada para excitar el parche radiante de la antena. Se realizan dos ranuras rectangulares una en el parche radiante, la otra ranura se realiza en el plano de tierra. Estas ranuras generan diferentes frecuencias de resonancia ayudan en la sintonización de estas y también mejoran el patrón de radiación [20]-[23].

El proceso de diseño de esta antena se realiza utilizando las ecuaciones básicas de diseño de antenas de microcinta, luego se optimiza el diseño utilizando CST Studio Suite; es un software de análisis de alto rendimiento para diseñar, analizar y optimizar componentes y sistemas electromagnéticos (EM) en 3D. CST Studio Suite ofrece rutinas de optimización automática para sistemas y dispositivos electromagnéticos. Los modelos CST Studio se pueden parametrizar con respecto a sus dimensiones geométricas o propiedades del material. Esto permite a los usuarios estudiar el comportamiento de un dispositivo a medida que cambian sus propiedades. CST Studio contiene varios algoritmos de optimización automática tanto locales como globales. Los optimizadores locales brindan una convergencia rápida, pero corren el riesgo de converger a un mínimo local en lugar de a la mejor solución general. Por otro lado, los optimizadores globales buscan en todo el espacio del problema, pero normalmente requieren más cálculos.

Después, de diseñar el modelo en el software se aplica el procedimiento para la generación del enmallado puede ser automático o manual, antes de que comience la simulación. El simulador utiliza el algoritmo (FIT) (Finite Integration Technique, por sus siglas en inglés), tratando de asegurar una mayor precisión de los resultados. Este es uno de los mejores métodos de discretización numérica para la simulación de campos electromagnéticos. La idea fundamental de esta técnica es aplicar las ecuaciones de Maxwell en forma integral a un conjunto de cuadrículas escalonadas. El uso de una cuadrícula ortogonal dual o cartesiana junto con un esquema de salto de rana conduce a algoritmos eficientes de cálculo y memoria adaptados para el análisis de campo transitorio en aplicaciones de RF.

Las dimensiones de la antena se calculan partiendo de la frecuencia central de 2.45 GHz en (1) y (2) donde: (W) = ancho del parche, (L) = longitud del parche. La longitud de las ranuras en la frecuencia central de 2.4 GHz se calculan a partir de (3) y (4) [24].

$$W = \frac{c}{2f_0\sqrt{\frac{\epsilon_R + 1}{2}}}; \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_R + 1}{2} + \frac{\epsilon_R - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12\left(\frac{h}{W}\right)}} \right] \quad (1)$$

$$L = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \left(\frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \right) \tag{2}$$

$$L = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{3}$$

$$f_r = \frac{c}{4 \times h\sqrt{(\epsilon_{reff})}} \tag{4}$$

Donde “c” es la velocidad de la luz, “f_r” es la frecuencia central y “ε_{reff}” es la permitividad relativa efectiva del sustrato que se calcula en 2.41 GHz. Para mejorar parámetros como la ganancia en las antenas se utilizan algunas técnicas como la inserción de ranuras, elementos parásitos y metamateriales [25]-[28].

En la Figura 2 se presenta el proceso de diseño de la antena monopolo propuesta. Inicialmente se presenta la antena con plano de tierra completo luego, se recorta el plano de tierra para mejorar el patrón de radiación, finalmente en el plano de tierra se realiza una inserción de ranura al igual que, en el parche radiante para ajustar a la frecuencia deseada.

En la Figura 3 se presenta la fotografía de la antena fabricada, el proceso de fabricación se llevó a cabo de manera artesanal, se imprime el diseño propuesto en adhesivo, luego se sumerge la placa de FR4 en percloruro de hierro, este retira las partes de cobre que no están cubiertas con el adhesivo dejando así el diseño impreso.

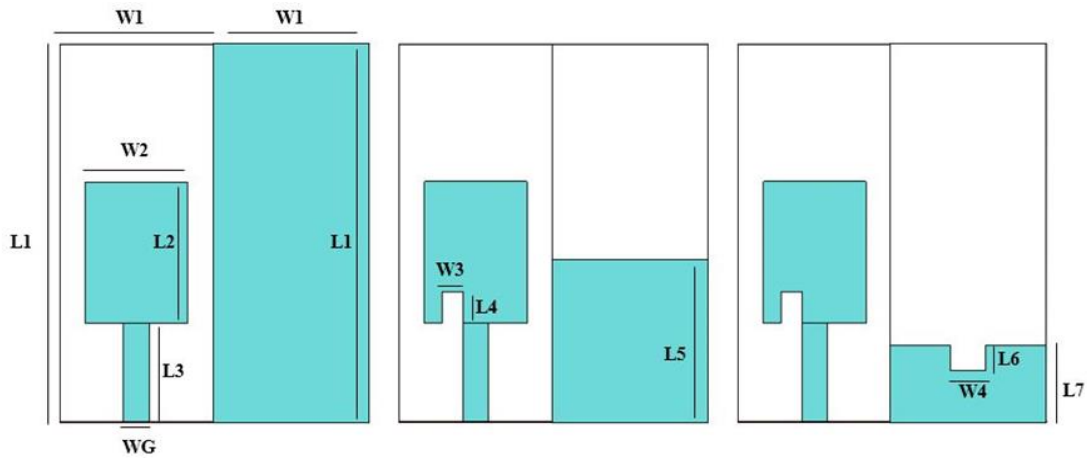


Figura 2. Proceso de diseño de la antena monopolo propuesta. Fuente: Elaboración propia.

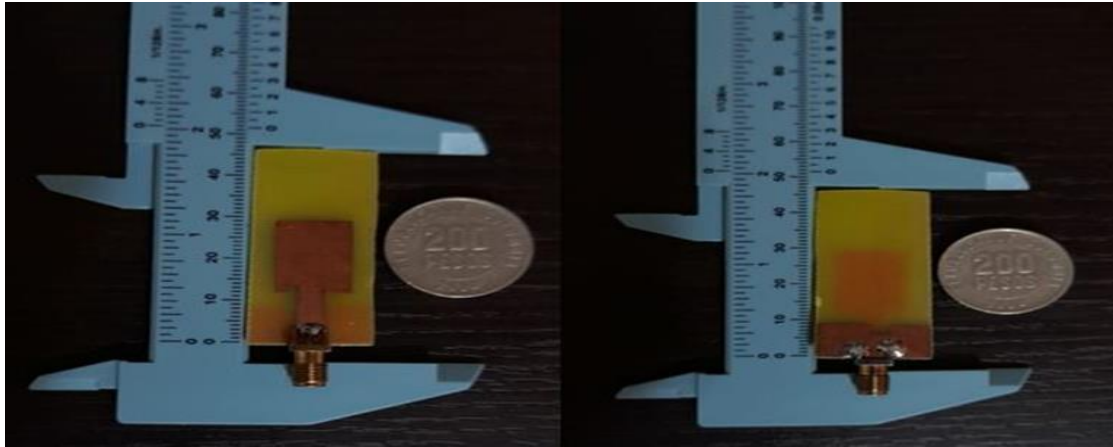


Figura 3. Antena fabricada. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4 se observa el desplazamiento que presenta el coeficiente de reflexión (S_{11}) provocado por la inserción de ranuras durante el proceso de diseño de la antena propuesta. Las ranuras insertadas fueron cambiando de posición y de dimensión hasta obtener las frecuencias deseadas con un buen ancho de banda.

En la Figura 5 se observan los diagramas de radiación en coordenadas polares de las frecuencias 2.48 GHz y 5.38 GHz, presentando una forma bidireccional con lóbulos opuestos. Estos lóbulos emiten o reciben energía tanto por delante como por detrás, esta característica favorece la captura de energía inalámbrica desde varios ángulos. En la Tabla 1 se presentan los parámetros de las dimensiones de la antena propuesta.

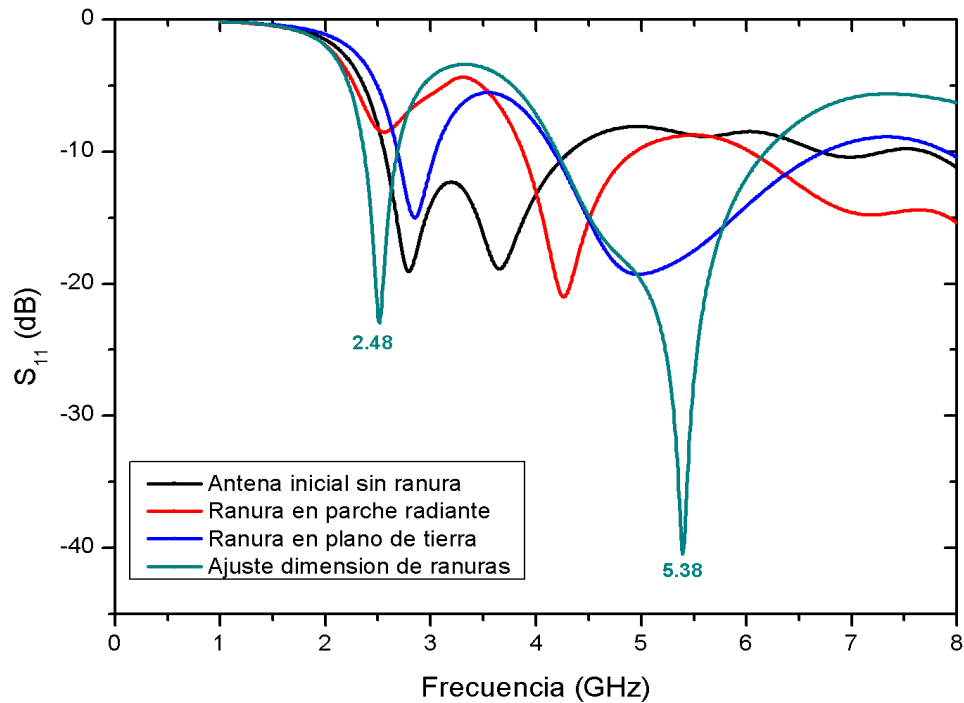


Figura 4. Coeficiente de reflexión (S_{11}) del proceso de evolución de la antena propuesta
Fuente: Elaboración propia.

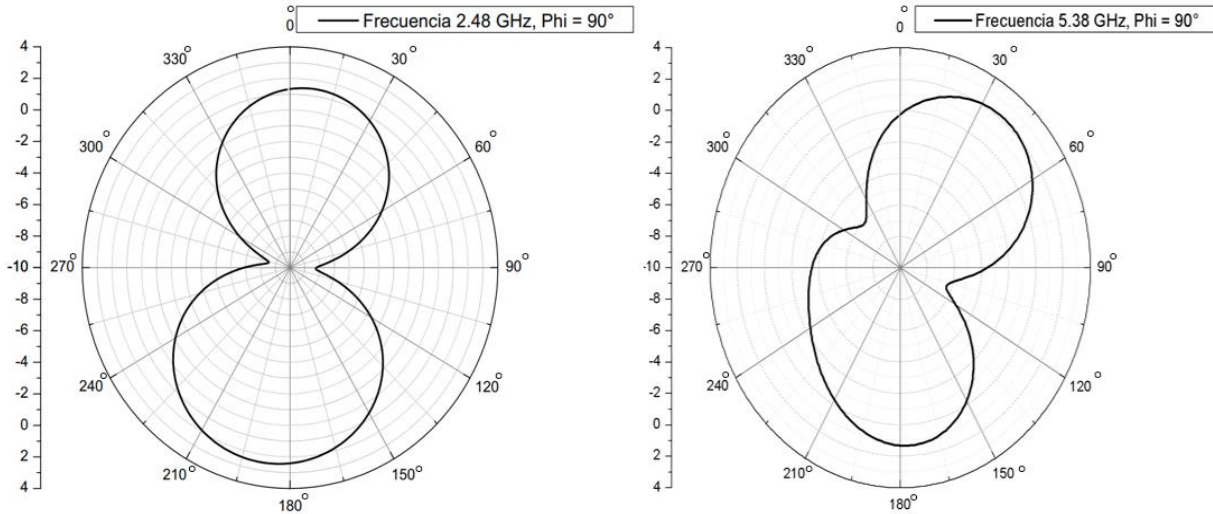


Figura 5. Patrones de radiación de la antena propuesta. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Parámetros de la Antena propuesta. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Dimensión (mm)	Parámetro	Dimensión (mm)
L1	6.09	L4	3.70
W1	5.95	W4	4.00
L2	5.61	L5	24.00
W2	12.00	L6	3.00
L3	11.50	L7	10.00
W3	2.50	WG	3.00

3. RESULTADOS

3.1 Resultados del diseño

Los resultados obtenidos mediante la simulación demuestran que la antena propuesta posee características de una antena de banda ancha (BW) según el estándar de la IEEE 802.11 para 2.4 GHz – 2.48 GHz para Bluetooth / Wi-Fi y futuras bandas de 5G.

Teóricamente la antena propuesta presenta para 2.48 GHz un BW = 313 MHz y una ganancia de 2.49 dB, para 5.38 GHz presenta un BW = 1790 MHz. con una ganancia de 4.01 dB. Los BW antes mencionados y el patrón de radiación ofrecen una ventaja de reciclar energía de RF de otros dispositivos cercanos sin la necesidad de apuntar directamente hacia ellos.

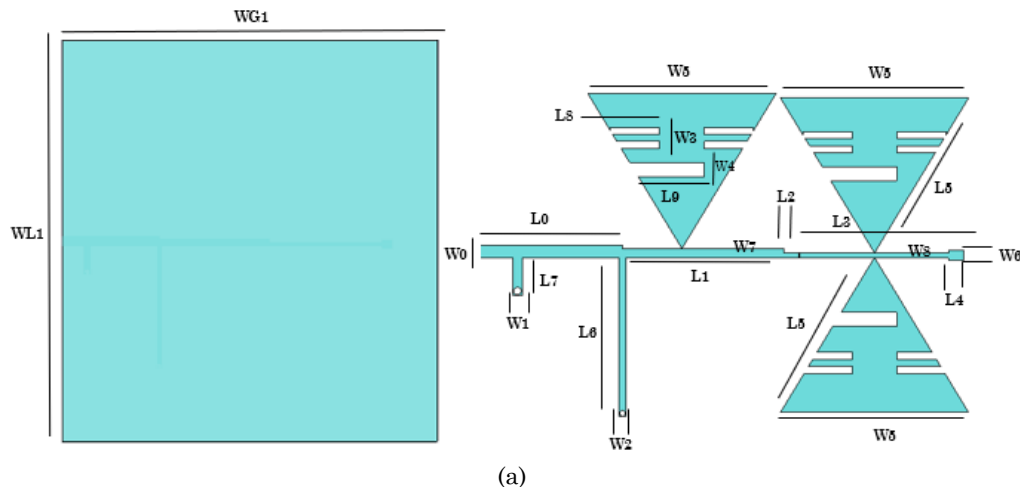
3.1.1 Diseño del rectificador

La densidad de potencia de la energía RF se encuentra disponible en pequeñas cantidades desde -50 dBm a -20 dBm, la distancia entre la fuente RF y el sistema recolector de energía es crucial ya que, de esto depende la eficiencia de dicho sistema. El nivel de voltaje de una señal de RF fluctúa entre 0.1 Voltio (V) a 1V, esto indica que se debe reciclar una buena cantidad de energía para utilizarla en dispositivos y sensores electrónicos que sean de bajo

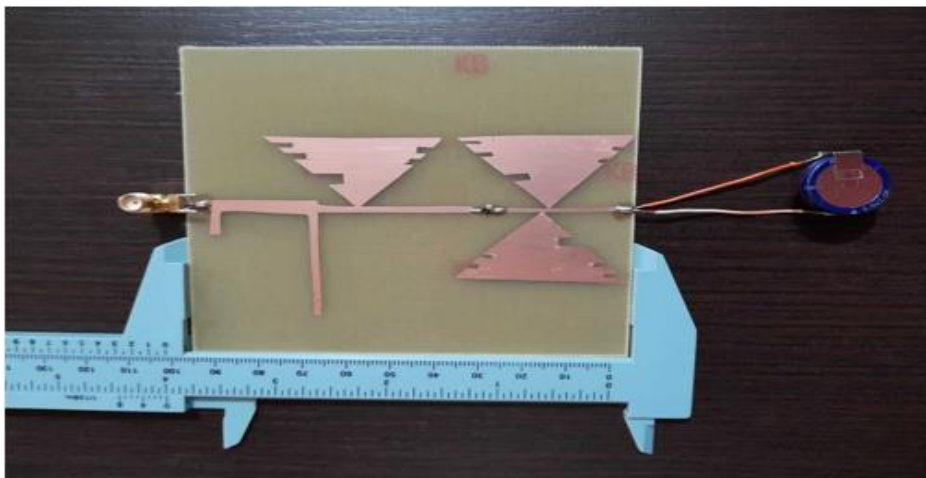
consumo de potencia, la unión entre el circuito rectificador y la antena se conoce como rectenna [10].

En la cosecha de energía inalámbrica por medio de rectennas, se utilizan dos tipos de rectificadores integrados a las antenas, el primero de ellos es basado en la tecnología CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), son rectificadores compactos capaces de trabajar con bajas potencias de entrada sin embargo, operan en una sola banda de frecuencia; estos rectificadores pueden aumentar la eficiencia de carga de energía recolectada disminuyendo las pérdidas de energía suministrada a los dispositivos [29], [30]. Otro tipo de rectificador es basado en la tecnología PCB (Printed Circuit Board), es fácil de diseñar e integrar con circuitos impresos, opera en múltiples bandas de frecuencia, además, su bajo costo permite realizar múltiples diseños [31], [32].

Para garantizar la rectificación y entrega de energía al sistema recolector se deben minimizar las pérdidas de transmisión y reflexión de la antena al rectificador, garantizando una red de adaptación de impedancia [33], para esto se diseña un rectificador simple de triple banda con ranuras basado en tecnología PCB [34], se utiliza el substrato FR4 utilizado en el diseño de la antena propuesta. El diseño del rectificador se muestra en la Figura 6a.



(a)



(b)

Figura 6. Diseño y construcción de rectificador. Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros de la Figura 6a en mm son: $L_0 = 28.7$, $L_1 = 35$, $L_2 = 3.05$, $L_3 = 30.25$, $L_4 = 3$, $L_5 = 37.41$, $L_6 = 33.80$, $L_7 = 8$, $L_9 = 14.55$, $WL_1 = 10$, $W_0 = 2.64$, $W_1 = 2$, $W_2 = 1.4$, $W_3 = 1.5$, $W_4 = 3$, $W_5 = 38.11$, $W_6 = 2.20$, $W_7 = 2.20$, $W_8 = 1.5$, $WG_1 = 10$. En la Figura 6b se presenta el rectificador diseñado y la simulación de los coeficientes de reflexión se presenta en la Figura 7. La simulación presentó como resultado las frecuencias de operación en 2.52 GHz, 3.85 GHz, 6.33 GHz y 7.55 GHz. El diseño del rectificador está basado en una red de adaptación de impedancia con una línea de transmisión en forma de T y con inserción de un diodo Schotkky HSMS-286C el cual es adecuado para aplicaciones de baja potencia con un umbral de ruptura entre 0.15 V y 3.8 V [35]. El filtro de paso para la corriente continua está compuesto por tres figuras triangulares con iguales dimensiones e igual número de ranuras en forma de cascada para optimizar el diseño y lograr desplazar la frecuencia fundamental a la frecuencia de operación deseada. La simulación también se realiza con el software CST Studio.

3.2 Resultados experimentales

Antes de realizar la captación de energía RF, se realiza una prueba de comparación de medidas de potencia Figura 8, se ejecuta un programa en GNU Radio utilizando la tarjeta NI USRP-2901, para ver el espectro y detectar la intensidad de señal recibida por la antenna propuesta contra una antenna de referencia comercial, la antenna monopolo guía VERT2450 de doble banda 2.4 GHz a 2.5 GHz y 4.9 GHz a 5.9 GHz, es una antenna omnidireccional con una ganancia de 3 dBi, esta antenna es utilizada en los puntos de acceso inalámbricos (AP) según el estándar 802.11b/g/n. El procedimiento anterior se repite utilizando la antenna propuesta como se observa en la Figura 9.

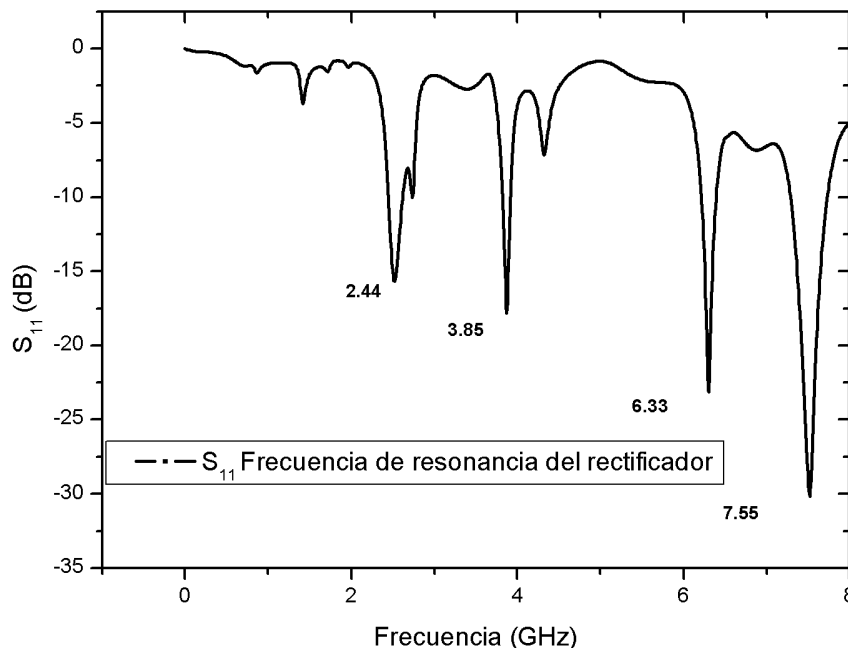


Figura 7. Coeficientes de reflexión del circuito rectificador. La frecuencia de interés para realizar el ejercicio de captación de energía RF se ubica en 2.44 GHz. Fuente: Elaboración propia.

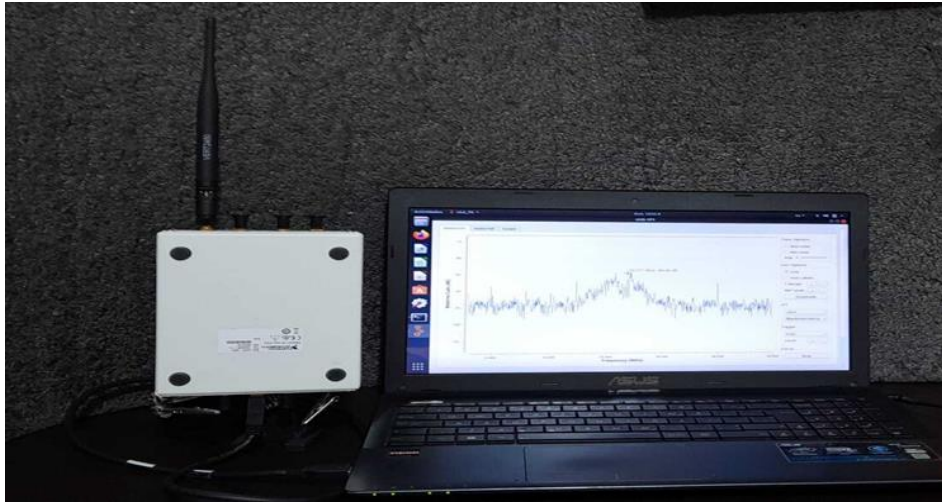


Figura 8. Toma de medidas de intensidad de señal con la antena VERT2450. Fuente: Elaboración propia.

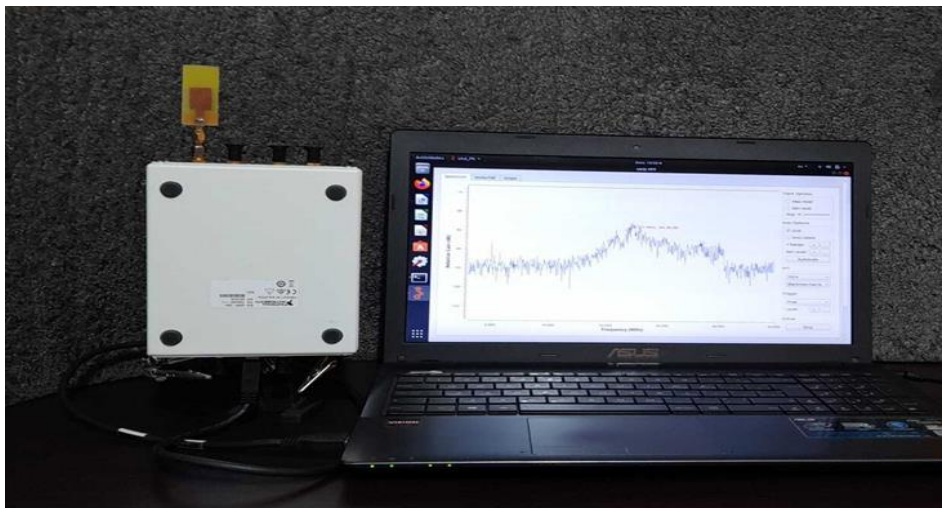


Figura 9. Toma de medidas de intensidad de señal con la antena propuesta. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2 se puede apreciar que la intensidad de señal recibida por la antena propuesta se asemeja a la señal de intensidad recibida por la antena guía, esto indica que la antena propuesta tiene buenas cualidades para operar a las frecuencias medidas.

3.2.1 *Proceso de captación de energía de RF*

Con el objetivo de lograr la captura de energía RF, se emula una transmisión a la frecuencia de 2.4 GHz y 5.4 GHz (Figura 10), imitando las frecuencias usadas en Wi-Fi. La cosecha de energía RF se realiza a una distancia de separación de 20 cm entre la fuente y la rectenna, las ondas de RF transmitidas por el sistema son recolectadas y rectificadas, la energía es almacenada en el capacitor.

Tabla 2. Comparación de intensidad de señal medida en (dBm) por las antenas en diferentes frecuencias
Fuente: Elaboración propia.

VERT2450 (GHz)	Intensidad de señal (dBm)	Antena propuesta (GHz)	Intensidad de señal (dBm)
2.39	-77.22	2.28	-89.41
2.40	-76.45	2.44	-90.45
2.42	-82.84	2.49	-89.49
2.45	-81.76	4.90	-90.20
4.50	-89.39	5.38	-87.33
5.00	-89.59	5.90	-87.33
5.38	-86.94	-	-
5.40	-85.52	-	-

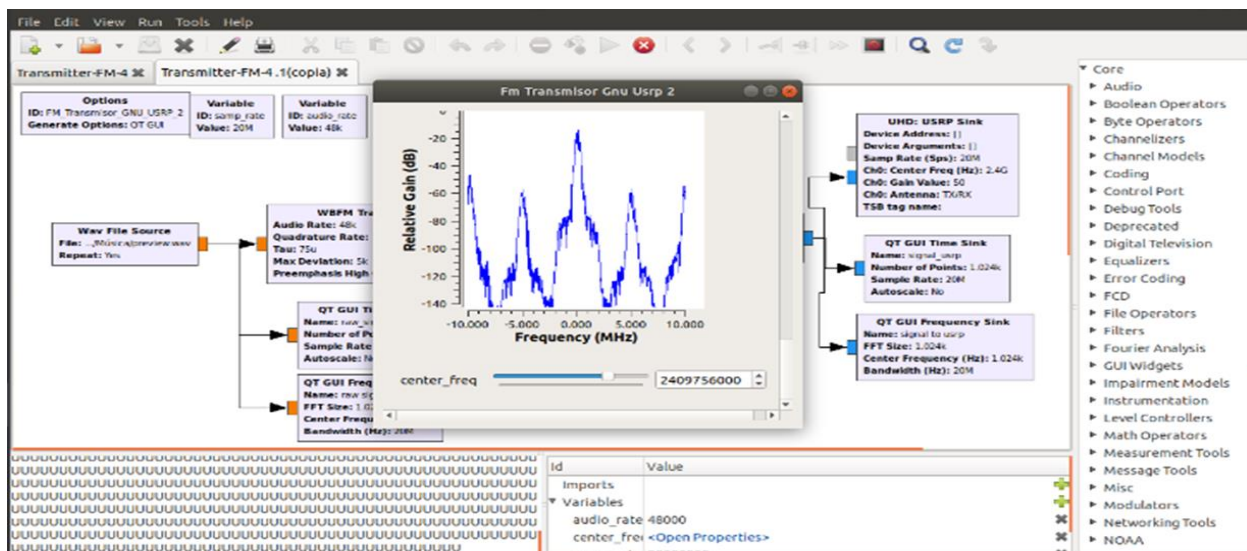


Figura 10. Toma de medidas de intensidad de señal con la antena propuesta. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11 se presenta el montaje realizado para efectuar la captura de energía inalámbrica mediante la rectenna propuesta, ubicada a 20 cm de distancia del transmisor, el multímetro muestra una carga de 3 V que se logran acumular por un tiempo de exposición continua de 120 horas.

En la Figura 12, se presentan los resultados obtenidos del proceso de captación de energía inalámbrica, la rectenna se expone durante un tiempo de 8 horas frente al transmisor, esta inicialmente presenta una carga de 20 microvoltios y finaliza con una carga de 122 microvoltios. La Figura 13, presenta una estimación de 116 horas para que la rectenna logre rectificar 1500 microvoltios suficientes para encender un led convencional.

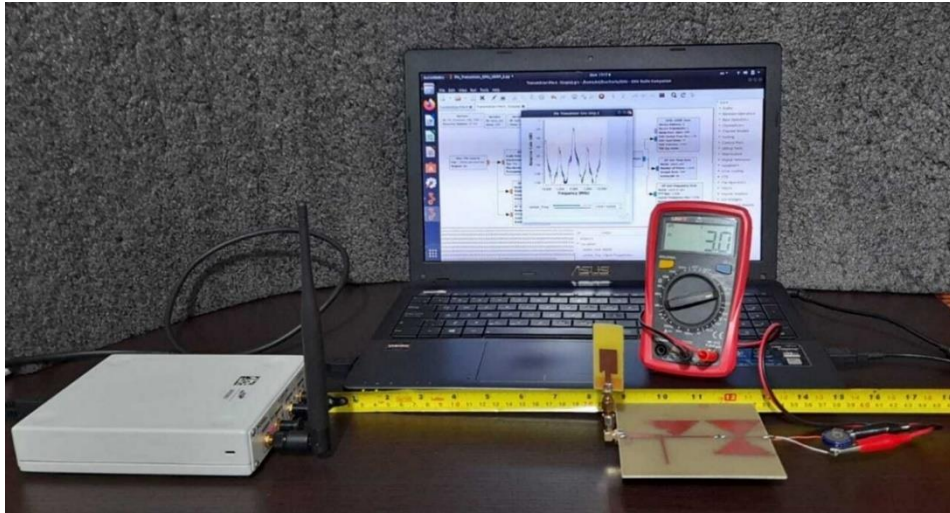


Figura 11. Captación de energía RF con la antena propuesta. Fuente: Elaboración propia.

Captación de energía RF – Rectenna propuesta

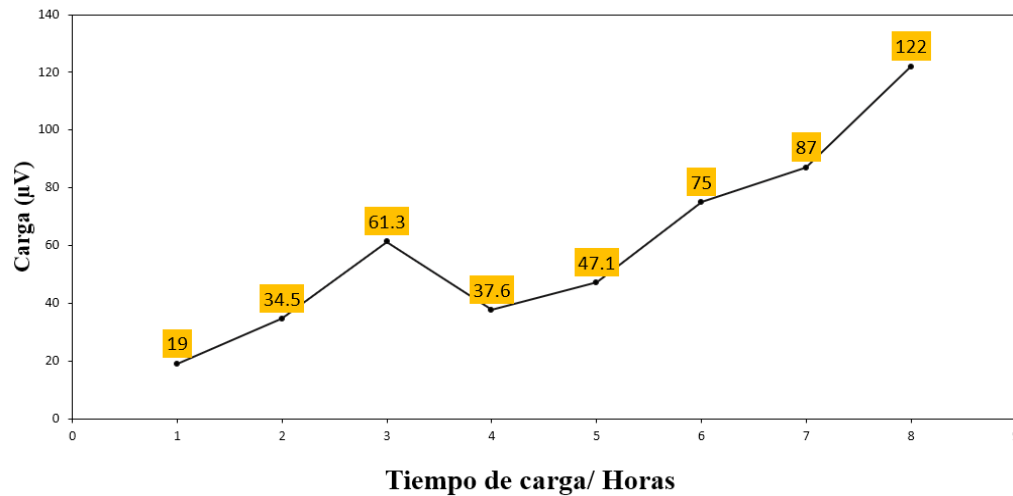


Figura 12. Datos de la cosecha de energía durante 8 horas en la frecuencia de 2.4 GHz, durante este tiempo se rectifican 122 microvoltios. Fuente: Elaboración propia.

Para verificar la utilidad de la rectenna se diseña un sencillo sensor detector de oscuridad que utiliza un diodo 2N2222, un diodo led, una resistencia de 220Ω , además, de una fotoresistencia como se presenta en la Figura 14.

Con el objetivo de lograr la captación de energía de RF en un ambiente real, se utiliza un router inalámbrico tp-link modelo: TL-WR940N con un ancho de canal de 20 MHz para transmitir frecuencias en 2.40 GHz y 5.0 GHz Wi-Fi, como se muestra en la Figura 15a. Inicialmente, el router y la antena propuesta están separadas a 1 metro de distancia, esta distancia fue disminuyendo hasta llegar a 30 cm donde se pudo lograr la captación de energía de RF evaluada en un tiempo de carga de 120 horas seguidas como se observa en la Figura 15b.

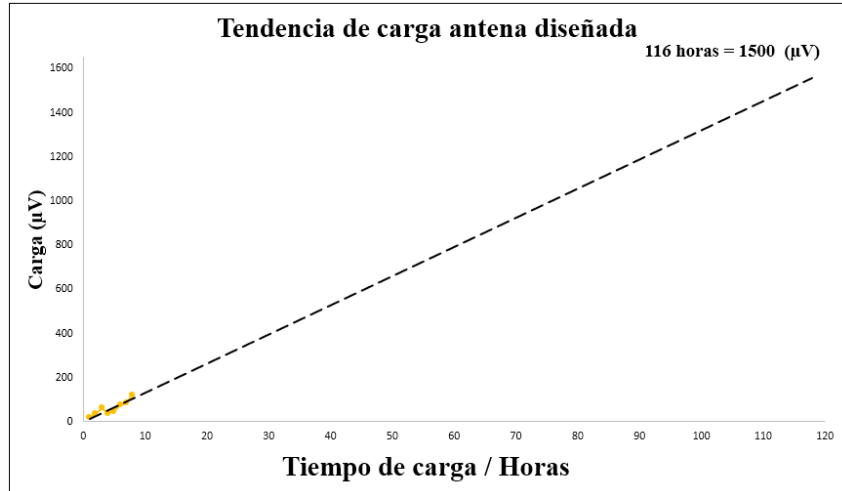


Figura 13. Datos de la tendencia de carga, esta apunta a que en 116 horas se puede lograr la rectificación de 1500 microvoltios suficientes para encender un led convencional. Fuente: Elaboración propia.

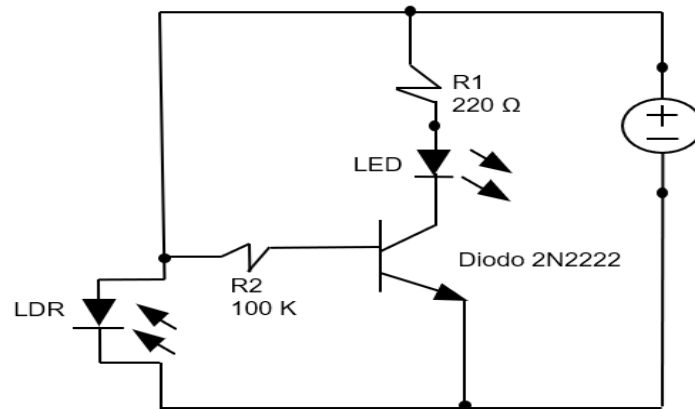


Figura 14. Sensor detector de oscuridad. Fuente: Elaboración propia.

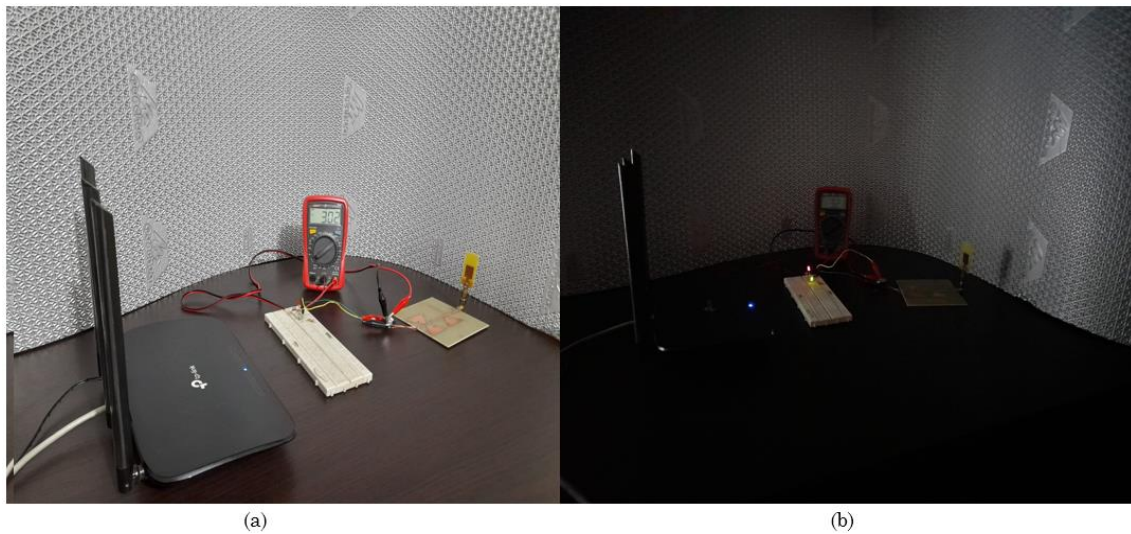


Figura 15. (a) Captación de energía RF con la rectenna propuesta logrando 3.02 V de carga. (b) Prueba del sensor de oscuridad. Fuente: Elaboración propia.

La eficiencia de conversión de RF a CC de la rectenna propuesta y evaluada obtiene una baja eficiencia en las bandas operativas, algunas razones para que esto ocurra es la baja eficiencia de la antena, también a una mala adaptación de impedancias entre la antena y el rectificador a las frecuencias correspondientes. La eficiencia de conversión alcanzada por la rectenna es calculada en (5).

$$\eta_{ce\%} = \frac{P_{DC}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{V_{DC}^2}{R_L P_{in}} \times 100\% \quad (5)$$

Donde V_{DC} = Tensión de CC de salida medida, R_L = Resistencia de carga en la salida.

La eficiencia de conversión de RF a CC de la rectenna propuesta y evaluada presenta una eficiencia de 10.24% en las frecuencias de 2.40 GHz y 5.0 GHz con una potencia de -74 dB y de -85 dB.

4. DISCUSIONES

Es importante tener en cuenta que el nivel de potencia alcanzado mediante el uso de las rectennas propuestas actualmente es bajo, pero es suficiente para las pruebas de concepto. Para encender un dispositivo, es importante conocer la energía consumida por los sensores que forman parte de algunos sistemas por ejemplo sistemas IoT. El consumo de energía de diferentes dispositivos/ sensores domésticos, personales e industriales se resumen en la Tabla 3. Se puede observar a partir de los datos presentados en esta tabla, se requiere energía del orden de decenas de microvatios para que estos dispositivos funcionen correctamente. Otros sensores como los industriales requieren una potencia relativamente alta en milivatios para funcionar de forma continua. Una forma de equilibrar la energía recolectada con la potencia demandada por el sensor es captar energía de forma continua, pero operar el terminal del sensor a intervalos. Esto se puede implementar en los sistemas de IoT de próxima generación al captar la energía generada en un capacitor y ejecutar la operación del sensor a intervalos, lo que da como resultado un método que equilibra la generación de energía con el consumo de energía.

Finalmente, en la Tabla 4 se presenta una comparación entre diferentes investigaciones sobre rectennas y la rectenna propuesta en este documento.

Tabla 3. Consumo de energía de diferentes dispositivos. Fuente: Elaboración propia.

Dispositivo	Consumo de energía	Referencias
Detector de humo	55 μ W	[11]
Detector de Co	1.5mW	[11]
Medidor de Gas	5.12mW	[11]
Reloj Inteligente	31mW	[11]
Memoria Flash Wi-Fi	350mW a 210mW	[11]
Teléfono Inteligente	0.5W	[11]
Audífono	1.5W	[36]

Tabla 4. Comparación entre la rectenna propuesta vs trabajos relacionados. Fuente: Elaboración propia.

Bandas de operación	BW	Geometría	Diodo	Referencia
4 GHz a 8 GHz	170 MHz	Parche cuadrado con ranuras	Schottky HSMS-2880	[37]
2.40 GHz	25 MHz	Parche rectangular	Schottky HSMS-2880	[11]
2.45 GHz	150 MHz	Parche rectangular con ranura	Schottky HSMS-2850	[10]
2.45 GHz a 2.60 GHz	9 MHz a 138 MHz	Monopolo con anillos	SMS 7630	[38]
2.40 GHz a 5.38 GHz	316 MHz a 1786 MHz	Parche con ranura	Schottky HSMS-286c	Este trabajo

5. CONCLUSIONES

Este documento presento una rectenna de bajo para la captación de energía RF, capturada de las ondas emitidas por sistemas Wi-Fi, la antena es compacta y de fácil construcción, al igual que el circuito rectificador este es de tamaño moderado, sin embargo, la mayor contribución la ejerce el diodo Schottky debido a, la capacidad que tiene para rectificar a frecuencias de 2.44 GHz.

El rectificador ha logrado recolectar 3 voltios en 120 horas, sin embargo, esto se pudo lograr en este tiempo con la ayuda de otras fuentes de energía que se encuentran en el medio de las que no se tiene control.

La antena presentada es viable para usarla en aplicaciones de IoT puesto que, se encuentra en el rango de operación de aplicaciones de WLAN y WiMAX. La creación de ranuras dentro de la estructura de las antenas puede alterar el funcionamiento de estas al realizar la correcta ubicación se logran mejoras como la generación de nuevas frecuencias de trabajo y mejoras en el BW. Se debe trabajar a futuro en la mejora del circuito rectificador logrando la miniaturización de este y mejorando la eficiencia de rectificación.

6. AGRADECIMIENTOS Y FINANCIACIÓN

Este documento se deriva de un trabajo de tesis de Maestría y no cuenta con ningún apoyo económico por parte de proyectos, ni de alguna financiación por parte de organismos o instituciones públicas o privadas.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores no declaran algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Edison Andrés Zapata Ochoa: contribuyó a la redacción, análisis y conceptualización.
Francisco López Giraldo: contribuyó a la conceptualización, revisión y supervisión.

Germán David Góez: contribuyó a la conceptualización, revisión y supervisión.

7. REFERENCIAS

- [1] S. Zeadally, F. K. Shaikh, A. Talpur, and Q. Z. Sheng, "Design architectures for energy harvesting in the Internet of Things," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 128, p. 109901, Aug. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109901>
- [2] M. Cansiz, D. Altinel, and G. K. Kurt, "Efficiency in RF energy harvesting systems: A comprehensive review," *Energy*, vol. 174, pp. 292–309, May 2019, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.100>
- [3] R. K. Sidhu, J. Singh Ubhi, and A. Aggarwal, "A Survey Study of Different RF Energy Sources for RF Energy Harvesting," in *2019 International Conference on Automation, Computational and Technology Management (ICACTM)*, Apr. 2019, pp. 530–533. <https://doi.org/10.1109/ICACTM.2019.8776726>
- [4] W. Saeed, N. Shoaib, H. M. Cheema, and M. U. Khan, "RF Energy Harvesting for Ubiquitous, Zero Power Wireless Sensors," *Int J Antennas Propag*, vol. 2018, pp. 1–16, Apr. 2018, <https://doi.org/10.1155/2018/8903139>
- [5] M. Piñuela, P. D. Mitcheson, and S. Lucyszyn, "Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments," *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 61, no. 7, pp. 2715–2726, Jul. 2013, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2013.2262687>
- [6] N. Md. Din, C. K. Chakrabarty, A. Bin Ismail, K. K. A. Devi, and W.-Y. Chen, "Design of RF Energy Harvesting System for Energizing Low Power Devices," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 132, pp. 49–69, Sep. 2012, <https://doi.org/10.2528/PIER12072002>
- [7] T.-L. Nguyen, Y. Sato, and K. Ishibashi, "7.6 μ W Ambient Energy Harvesting Rectenna from LTE Mobile phone Signal for IoT Applications," in *2020 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, Oct. 2020, pp. 45–49. <https://doi.org/10.1109/ATC50776.2020.9255471>
- [8] V. Talla, S. Pellerano, H. Xu, A. Ravi, and Y. Palaskas, "Wi-Fi RF energy harvesting for battery-free wearable radio platforms," in *2015 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, Apr. 2015, pp. 47–54. <https://doi.org/10.1109/RFID.2015.7113072>
- [9] S. Muhammad *et al.*, "Harvesting Systems for RF Energy: Trends, Challenges, Techniques, and Tradeoffs," *Electronics (Basel)*, vol. 11, no. 6, p. 959, Mar. 2022, <https://doi.org/10.3390/electronics11060959>
- [10] Q. Awais, Y. Jin, H. T. Chattha, M. Jamil, H. Qiang, and B. A. Khawaja, "A Compact Rectenna System With High Conversion Efficiency for Wireless Energy Harvesting," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 35857–35866, Jun. 2018, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2848907>
- [11] K. Shafique *et al.*, "Energy Harvesting Using a Low-Cost Rectenna for Internet of Things (IoT) Applications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30932–30941, May. 2018, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2834392>
- [12] D. H. Sadek, H. A. Shawkey, and A. A. Zekry, "Compact and High-Efficiency Rectenna for Wireless Power-Harvesting Applications," *Int J Antennas Propag*, vol. 2021, pp. 1–8, Dec. 2021, <https://doi.org/10.1155/2021/1109850>
- [13] H. P. Partal, A. T. Ince, M. A. Belen, S. Zorlu-Partal, and R. Tanski, "Electromagnetic modeling and analysis of rectifier antennas," in *2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Sep. 2015, pp. 1489–1492. <https://doi.org/10.1109/ICEAA.2015.7297370>
- [14] D.-K. Ho, I. Kharrat, V.-D. Ngo, T.-P. Vuong, Q.-C. Nguyen, and M.-T. Le, "Dual-band rectenna for ambient RF energy harvesting at GSM 900 MHz and 1800 MHz," in *2016 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, Nov. 2016, pp. 306–310. <https://doi.org/10.1109/ICSET.2016.7811800>
- [15] S. Shrestha, S. R. Lee, and D.-Y. Choi, "A New Fractal-Based Miniaturized Dual Band Patch Antenna for RF Energy Harvesting," *Int J Antennas Propag*, vol. 2014, pp. 1–9, Jan. 2014, <https://doi.org/10.1155/2014/805052>
- [16] A. D. Boursianis *et al.*, "Triple-Band Single-Layer Rectenna for Outdoor RF Energy Harvesting Applications," *Sensors*, vol. 21, no. 10, p. 3460, May 2021, <https://doi.org/10.3390/s21103460>
- [17] S. Roy, J. J. Tiang, M. B. Roslee, M. T. Ahmed, A. Z. Kouzani, and M. A. P. Mahmud, "Quad-Band Rectenna for Ambient Radio Frequency (RF) Energy Harvesting," *Sensors*, vol. 21, no. 23, p. 7838, Nov. 2021, <https://doi.org/10.3390/s21237838>
- [18] N. Singh, B. K. Kanaujia, M. T. Beg, Mainuddin, T. Khan, and S. Kumar, "A dual polarized multiband rectenna for RF energy harvesting," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 93, pp. 123–131, Sep. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.06.020>
- [19] J. M. Barcak and H. P. Partal, "Efficient RF energy harvesting by using multiband microstrip antenna arrays with multistage rectifiers," in *2012 IEEE Subthreshold Microelectronics Conference (SubVT)*, Oct. 2012, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/SubVT.2012.6404327>

- [20] D. Pozar, "A reciprocity method of analysis for printed slot and slot-coupled microstrip antennas," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 34, no. 12, pp. 1439–1446, Dec. 1986, <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143785>
- [21] S. I. Latif, L. Shafai, and S. K. Sharma, "Bandwidth enhancement and size reduction of microstrip slot antennas," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 53, no. 3, pp. 994–1003, Mar. 2005, <https://doi.org/10.1109/TAP.2004.842674>
- [22] C. Song, P. Lu, and S. Shen, "Highly Efficient Omnidirectional Integrated Multiband Wireless Energy Harvesters for Compact Sensor Nodes of Internet-of-Things," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 9, pp. 8128–8140, Sep. 2021, <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3009586>
- [23] D. Surender *et al.*, "Semi-Annular-Ring slots loading for broadband circularly polarized DR-Rectenna for RF energy harvesting in smart city environment," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 147, p. 154143, Apr. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2022.154143>
- [24] A. Yadav, D. Sethi, and R. K. Khanna, "Slot loaded UWB antenna: Dual band notched characteristics," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 70, no. 3, pp. 331–335, Mar. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2015.12.014>
- [25] Z. W. Sim, R. Shuttleworth, M. J. Alexander, and B. D. Grieve, "Compact Patch Antenna Design for Outdoor RF Energy Harvesting in Wireless Sensor Networks," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 105, pp. 273–294, Jun. 2010, <https://doi.org/10.2528/PIER10052509>
- [26] M. Afrough, M. M. Fakharian, and F. Tavakol-Hamedani, "Compact Dual-Band Suspended Microstrip Slot Antenna with an Antipodal Parasitic Element for WLAN Applications," *Wirel Pers Commun*, vol. 83, no. 1, pp. 571–579, Jul. 2015, <https://doi.org/10.1007/s11277-015-2409-z>
- [27] A. R. Harish and R. K. Joshi, "Studies on application of fractal based geometries in printed antenna structures," in *2007 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*, Dec. 2007, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/AEMC.2007.4638065>
- [28] F.-J. Huang, T.-C. Yo, C.-M. Lee, and C.-H. Luo, "Design of Circular Polarization Antenna With Harmonic Suppression for Rectenna Application," *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 11, pp. 592–595, May. 2012, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2201437>
- [29] S. Vázquez-Valdés *et al.*, "A Novel CMOS reconfigurable rectifier for wearable piezoelectric energy harvesters," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 21, no. 1, pp. 103–112, Nov. 2021, <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n1-2022009>
- [30] I. D. Bougas, M. S. Papadopoulou, K. Psannis, P. Sarigiannidis, and S. K. Goudos, "State-of-the-Art Technologies in RF Energy Harvesting Circuits – A Review," in *2020 3rd World Symposium on Communication Engineering (WSCE)*, Oct. 2020, pp. 18–22. <https://doi.org/10.1109/WSCE51339.2020.9275507>
- [31] A. Okba, A. Takacs, H. Aubert, S. Charlot, and P.-F. Calmon, "Multiband rectenna for microwave applications," *C R Phys*, vol. 18, no. 2, pp. 107–117, Feb. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2016.12.002>
- [32] N. Singh *et al.*, "Low profile multiband rectenna for efficient energy harvesting at microwave frequencies," *International Journal of Electronics*, vol. 106, no. 12, pp. 2057–2071, Dec. 2019, <https://doi.org/10.1080/00207217.2019.1636302>
- [33] A. Panigrahi, D. Paul, S. Gupta, S. Chourasia, and T. Nath, "A comparative study of integrated RF to DC power conversion system for RF energy harvesting," *Mater Today Proc*, Jun. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.633>
- [34] J.-J. Lu, X.-X. Yang, H. Mei, and C. Tan, "A Four-Band Rectifier With Adaptive Power for Electromagnetic Energy Harvesting," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 10, pp. 819–821, Oct. 2016, <https://doi.org/10.1109/LMWC.2016.2601294>
- [35] L. Yang, Y. J. Zhou, C. Zhang, X. M. Yang, X.-X. Yang, and C. Tan, "Compact Multiband Wireless Energy Harvesting Based Battery-Free Body Area Networks Sensor for Mobile Healthcare," *IEEE J Electromagn RF Microw Med Biol*, vol. 2, no. 2, pp. 109–115, Jun. 2018, <https://doi.org/10.1109/JERM.2018.2817364>
- [36] O. Georgiou, K. Mimis, D. Halls, W. H. Thompson, and D. Gibbins, "How Many Wi-Fi APs Does it Take to Light a Lightbulb?," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 3732–3746, May 2016, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2573681>
- [37] T. Almoneef and O. M. Ramahi, "Split-Ring Resonator Arrays for Electromagnetic Energy Harvesting," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 62, no. 1, pp. 167–180, Mar. 2015, <https://doi.org/10.2528/PIERB15012506>
- [38] A. Benayad and M. Tellache, "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*, vol. 30, no. 2, p. e22031, Feb. 2020, <https://doi.org/10.1002/mmce.22031>