



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DISEÑO DE UNA RECTENA PARA RECOLECCIÓN DE ENERGÍA
ELECTROMAGNÉTICA A 2.4GHZ**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Electrónico

AUTOR: Kevin Adrián Martínez Villacís

Alex Daniel Picho Cusi

TUTOR: Luis Germán Oñate Cadena

Quito-Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Kevin Adrián Martínez Villacís con documento de identificación N° 1723474241 y Alex Daniel Picho Cusi con documento de identificación N° 1723428601; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 08 de abril del año 2022

Atentamente,



Kevin Adrián Martínez Villacís

1723474241



Alex Daniel Picho Cusi

1723428601

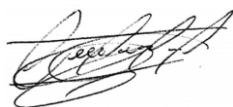
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Kevin Adrián Martínez Villacís con documento de identificación No. 1723474241 y Alex Daniel Picho Cusi con documento de identificación No. 1723428601, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Diseño de una rectena para recolección de energía electromagnética a 2.4ghz”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 08 de abril del año 2022

Atentamente,



Kevin Adrián Martínez Villacís

1723474241



Alex Daniel Picho Cusi

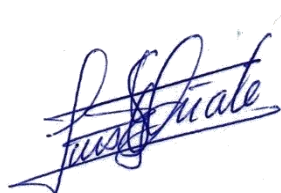
1723428601

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Germán Oñate Cadena con documento de identificación N° 1712157401, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UNA RECTENA PARA RECOLECCIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA A 2.4GHZ realizado por Kevin Adrián Martínez Villacís con documento de identificación No. 1723474241 y por Alex Daniel Picho Cusi con documento de identificación No. 1723428601, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 08 de abril del año 2022

Atentamente,



Ing. Luis Germán Oñate Cadena, MSc
1712157401

Dedicatoria

Este trabajo de final de carrera va a dedicado a mi familia que fue soporte y pilar fundamental durante todo el trayecto de mi formación académica, para lograr llegar hasta este punto en mi vida, de igual forma va dedicado para mis amigos que me acompañaron, colaboraron y fueron parte de este largo proceso.

Kevin Adrián Martínez Villacís

Este proyecto de titulación se lo dedico a mis padres Nanci, Germán y a mi hermana Evelin que, con su apoyo incondicional, forjaron en mí valores para toda la vida. También se la dedico a mis amigos y familiares quienes han sido de gran ayuda en momentos difíciles en los cuales supieron sacarme una sonrisa, brindándome un buen consejo.

Alex Daniel Picho Cusi

Agradecimiento

Quiero agradecer principalmente a Dios y a mi padre por haberme dado la oportunidad de estudiar la carrera que deseaba y por haberme brindado todo el apoyo para poder llegar a esta etapa final, también quisiera agradecerle a mi tutor el Ingeniero Luis Oñate por el apoyo y la disposición para realizar este trabajo final, de igual forma quiero darle gracias a mi compañero de investigación y gran amigo Alex Picho por todo su apoyo y trabajo realizado en este proyecto y a lo largo de la carrera, por último quiero darle gracias a mis amigos más cercanos por su ayuda y su apoyo emocional en la realización de este trabajo.

Kevin Adrián Martínez Villacís

Quiero agradecer a Dios por haberme dado fortaleza y salud para seguir cumpliendo mis metas, al ingeniero Luis Oñate quien desde el primer día estuvo dispuesto a ayudarnos. De igual manera agradecer a mi amigo Kevin Martínez quien no sólo fue mi compañero para realizar esta investigación, sino también un gran amigo a lo largo de nuestra vida universitaria.

Alex Daniel Picho Cusi

DISEÑO DE UNA RECTENA PARA RECOLECCIÓN DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA A 2.4GHZ

Kevin Adrián Martínez Villacís
Departamento de Ingeniería
Electrónica y
Telecomunicaciones
Universidad Politécnica
Salesiana Quito, Ecuador
kmartinezv1@est.ups.edu.ec

Alex Daniel Picho Cusi
Departamento de Ingeniería
Electrónica y
Telecomunicaciones
Universidad Politécnica
Salesiana Quito, Ecuador
apicho@est.ups.edu.ec

Luis Germán Oñate Cadena
Departamento de Ingeniería
Electrónica y
Telecomunicaciones
Universidad Politécnica
Salesiana Quito, Ecuador
lonatec@ups.edu.ec

Resumen— Se presenta una alternativa a las fuentes de alimentación de los sensores IoT inalámbricos con la recolección de energía ya que su funcionamiento actualmente se ve limitado al uso de baterías. Diversos estudios en años anteriores indican que la recolección de energía por radio frecuencia se obtiene con facilidad desde un punto de acceso debido a su disponibilidad y abundancia. En este trabajo se diseña y realiza por separado la simulación de una rectena a 2.4 GHz utilizando el software ANSYS para la antena y el software ADS para el circuito rectificador para posteriormente realizar una cosimulación. La rectena se compone de una antena microstrip tipo parche simulada en la que se analizan los parámetros S, VSWR, patrón de radiación y terminal Z. Esta se conectó a una red de acoplamiento de impedancias, donde se verificó los parámetros S y VSWR para garantizar la máxima transferencia de potencia en el circuito y obtener a la salida una señal DC con 13 mA de corriente y 3.087 V a una potencia de 15 dBm para alimentar el sensor de movimiento PIR (Infrarrojo pasivo) de la marca Panasonic utilizado en IoT. Para el circuito rectificador se logra determinar también la cantidad de etapas de multiplicadores de voltaje Dickson tomando en cuenta ciertos factores importantes como el rango de potencia con el que se va a trabajar y obtener así a la salida el voltaje y la corriente que permitan alimentar el sensor PIR.

Palabras Clave— Rectena, antena microstrip, IoT, recolección, energía electromagnética, rectificador.

Abstract— An alternative to power supplies for wireless IoT sensors with energy harvesting is presented as their operation is currently limited to the use of batteries. Several studies in previous years indicate that radio frequency energy harvesting is easily obtained from an access point due to its availability and abundance. In this work, a 2.4 GHz rectenna is designed and simulated using ANSYS software for the antenna and ADS software for the rectifier circuit. The rectenna is composed of a simulated microstrip patch antenna in which S, VSWR, radiation pattern and Z-terminal parameters are analyzed. This was connected to an impedance coupling network, where the S and VSWR parameters were verified to ensure maximum power transfer in the circuit and obtain a DC signal output with 13 mA current and 3,087 V at a power of 15 dBm capable of feeding the PIR (Passive Infra-Red) motion sensor of the Panasonic brand used in IoT. For the rectifier circuit it is also possible to determine the number of stages of Dickson voltage multipliers considering certain important factors such as the power range with which it will work and thus obtain the output voltage and current to power the PIR sensor.

Keywords— Rectenna, microstrip antenna, IoT, harvesting, electromagnetic energy, rectifier.

I.

II. INTRODUCCIÓN

La alimentación de los sensores IoT de baja potencia presenta limitaciones en el entorno de instalación ya que se obliga a usar baterías que muchas veces por sus características se ven afectadas en el funcionamiento de los sensores [1]. Tomando en cuenta estas limitaciones, la recolección de energía se convierte en una alternativa favorable, que en general se utiliza para extraer energía de fuentes externas que posteriormente es almacenada y convertida en otro tipo de energía eléctrica útil [2]. A partir del año 2000 se han venido realizando diversas investigaciones acerca de la recolección de energía en radio frecuencia (RF) encontrando que una de estas fuentes de energía se obtiene con facilidad de un punto de acceso (WiFi) debido a su disponibilidad y abundancia [3]. En el 2020 también se desarrolló una antena monopolo impresa en forma de Y, de bajo perfil, compacta y eficiente, con polarización circular (CP), que utiliza dos tiras conductoras parásitas y una meta superficie rectangular para la captación de energía de RF [4]. También se desarrolló una matriz de antenas rectificadoras compuestas por 48 antenas de microbanda y cinco microconvertidores elevadores utilizados para otros dispositivos de recolección de energía [5].

El diseño de la antena rectificadora se compone en general de una antena y un circuito rectificador, la antena es la encargada de capturar las ondas electromagnéticas emitidas por una fuente de RF, la potencia recibida por la antena pasa por un filtro pasa bajos para posteriormente ser rectificada y ser

convertida en corriente continua (DC) [6]. La red de adaptación ubicada entre la antena del receptor y el circuito rectificador es necesaria para reducir la pérdida de transmisión y aumentar la tensión en la entrada del circuito rectificador [7].

En este artículo se realiza el diseño y la cosimulación de una rectena, donde se espera obtener una salida de voltaje DC que sea capaz de alimentar un sensor inalámbrico IoT específicamente al sensor de movimiento PIR que trabaja a $170 \mu\text{A}$ [8]. De esta forma se podrá comprobar que a partir de la recolección de energía se obtiene energías alternativas a las baterías que utilizan los sensores IoT.

En la sección II del artículo se detalla los circuitos, parámetros y elementos que componen a la antena y al circuito rectificador, además de las fórmulas empleadas en este diseño. En la sección III se explica la simulación y los resultados obtenidos del parámetro S, VSWR, de la antena microstrip y del circuito rectificador, además el filtro pasa bajo y la red de impedancia que permitió obtener a la salida voltaje DC.

II. DISEÑO

A. Rectena

La rectena se diseñó y simuló de manera independiente utilizando el software ANSYS HFSS para la antena y el software ADS para el circuito rectificador, a la frecuencia de 2.4 GHz que pertenece a la banda S en el rango de 2 GHz a 4 GHz, correspondiente a las ondas centimétricas [9] [10].



Fig. 1. Diagrama de bloques de la transferencia de energía inalámbrica conformado por la antena tipo parche (capta la energía electromagnética), el acople inductivo, el filtro pasa bajos, el rectificador y la salida DC.

Antena Microstrip tipo parche

En la Figura. 2 se muestra el diseño geométrico de la antena microstrip tipo parche utilizando el software ANSYS HFSS con la finalidad de tener una frecuencia de 2.4 GHz. Los parámetros que caracterizan el funcionamiento de una antena son: el ancho de banda, la frecuencia resonante y la ganancia [11].

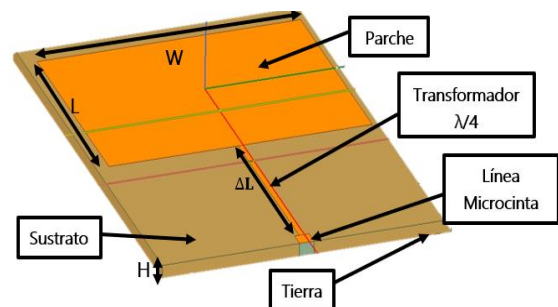


Fig. 2. Geometría de la antena microstrip tipo parche con línea microcinta.

El material dieléctrico para el diseño fue el FR4_epoxy que tiene $\epsilon_r = 4.4$, este material tiene tolerancia al fuego y a la humedad, al usar una línea microcinta permite reducir el tamaño de los componentes, el peso y el costo de la antena. Los principales parámetros de la antena se calculan por medio de las siguientes ecuaciones [12].

Ancho del parche

$$W = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (mm) \quad (1)$$

Constante dieléctrica efectiva

$$\epsilon_{reff} = \frac{(\epsilon_r + 1)(\epsilon_r - 1)}{2} \left[1 + 12 \frac{H}{W} \right]^{-1/2} \quad (2)$$

Extensión de longitud

$$\Delta L = 0.412 \cdot H \cdot \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{H} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{H} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

Longitud efectiva del elemento conductor

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (4)$$

Longitud del elemento radiador

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (5)$$

En la Tabla I se muestran los parámetros de la antena a 2.4 GHz, las dimensiones de los parámetros se encuentran en el orden de los milímetros, tomando en cuenta la tolerancia de fabricación. Donde: W corresponde al ancho, L corresponde al largo y H corresponde a la altura de los elementos que conforman la antena (sustrato, parche, tierra, transformador $\lambda/4$ y la línea microcinta).

TABLA I. MEDIDAS DE LOS PARÁMETROS DE LA ANTENA TIPO PARCHES PARA 2.4 GHZ.

Elemento	Parámetro	Medidas (mm)	Material
Sustrato	W	60	FR4_Epoxy
	L	40	
	H	1.6	
Parche	W	34.42	Cobre
	L	28.16	
Tierra	W	60	
	L	40	
Transformador $\lambda/4$	W	0.7	
	L	24	
Línea Microcinta	W	2	
	L	2	

B. Circuito rectificador

Para el sistema de rectificación se utilizó el software Advanced Design System (ADS), específicamente el rectificador convierte la señal de RF en DC el diseño se representa en el diagrama de bloques de la Figura. 3. El filtro pasa bajo sólo deja pasar las frecuencias bajas, eliminando los armónicos en frecuencias superiores para obtener menos reflexiones en el circuito, en este caso se utiliza un filtro pasa bajo con una frecuencia de corte de 2.5Ghz

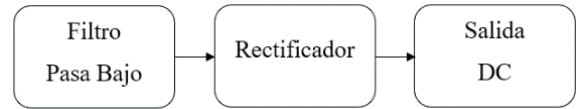


Fig. 3. Diagrama de bloques circuito rectificador.

Filtro pasa bajo

En la Figura. 4 se observa el circuito pasa bajo LC utilizado para la simulación, cuyos parámetros están definidos por la siguiente ecuación:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

Para el diseño del filtro se asumió un inductor de 1nH y utilizando la ecuación 6 se obtuvo un valor de capacitancia de 4.98pF, pero se usará una capacitancia de 4.7pF ya que es un valor comercial el cual se conectará en paralelo con el generador después del inductor en serie.

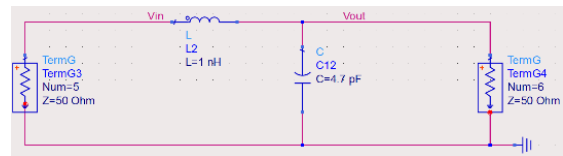


Fig. 4. Diagrama del filtro pasa bajo utilizando el software ADS.

Rectificador

Para el diseño del rectificador se utilizó la configuración de diodos multiplicadores de tensión Dickson, este modelo es utilizado ampliamente en diseños de recolección de energía, ya que trabaja mejor en sistemas de bajo voltaje, es por eso que se realiza la rectificación de la señal y la amplificación de voltaje, esto resulta ser una ventaja para sistemas que están compuestos por varias etapas en las cuales se producen pérdidas de potencia [13].

En estudios previos realizados con el multiplicador de voltaje Dickson se ha determinado que las capacitancias que superen valores de 1pF no provocan un gran efecto en el rendimiento del

rectificador, lo que significa que el desempeño del rectificador depende en gran parte de la resistencia y capacitancia parásitas dentro del diodo [17].

En la Figura 5 se observa el diseño del rectificador el cual se trata de un multiplicador de voltaje Dickson de dos etapas como se había mencionado anteriormente. Este circuito cambia el nivel de la señal RF, permitiendo el paso de la corriente solo en la dirección que carga el condensador, volviéndola totalmente positiva y posteriormente siendo atenuada con los capacitores, logrando así obtener una señal DC a la salida.

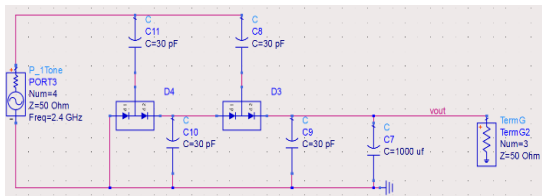


Fig. 5. Diagrama del circuito rectificador en ADS.

Red de adaptación de impedancias

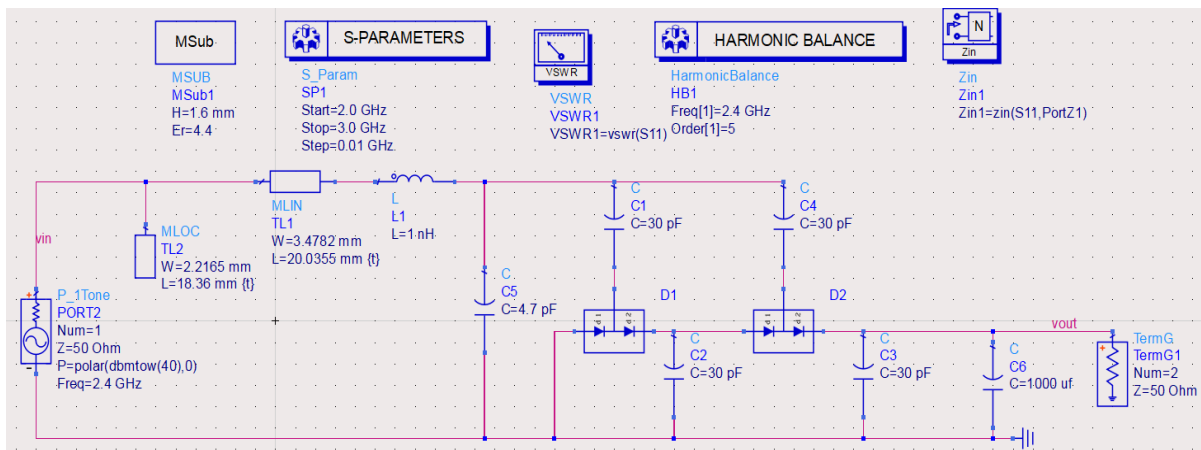


Fig. 6. Circuito completo de la antena rectificadora en ADS.

Una vez obtenido el bloque completo de rectificación del diseño propuesto, se debe como siguiente paso garantizar la máxima transferencia de potencia de la antena hacia el bloque de rectificación, es por eso por lo que se debe acoplar la impedancia del generador con la impedancia de entrada de nuestro circuito de rectificador [18].

Una de las topologías de red de acoplamiento de impedancias más utilizadas son los circuitos en L con componentes concentrados como bobinas e inductores, pero estos pueden reemplazarse por tramos de línea a los que se denominan stubs que brindan más flexibilidad y facilitan la implementación en el diseño de circuitos [19], para el diseño se utilizó un acople stub simple que son de los más usados para aplicaciones de RF.

En la Figura. 6 se observa el circuito de recolección de energía completo y adaptado, además de esto se añadió un capacitor a la salida del rectificador para eliminar el rizado que se introdujo en esta etapa.

III. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

ANTENA MICROSTRIP

A. Parámetro S

En la Figura. 7, se observa el parámetro S11 el cual describe la cantidad de potencia que es reflejada por la antena en diferentes frecuencias en este caso la antena resonó a una frecuencia de 2.4Ghz con un valor de -22.1451 dB.

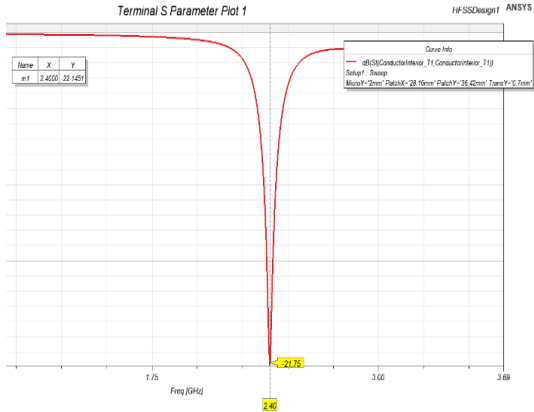


Fig. 7. Parámetro de dispersión S del diseño propuesto.

B. Relación de Onda Estacionaria (VSWR)

La relación onda estacionaria o VSWR representa la eficacia con la que se transmite la potencia de radiofrecuencia desde una fuente de energía, a través de una línea de transmisión, a una carga, este valor varía de 1 hasta infinito, donde los valores que se consideran como un buen acople de impedancias están entre el rango de 1 a 2, si el valor es 1 refleja que logra un acoplamiento ideal de impedancia por medio de la línea de transmisión, valores superiores a 1,5 dB y hasta 2 dB son aceptables [20], la Figura. 8 muestra que el valor del VSWR del diseño es de 1.3598 dB.

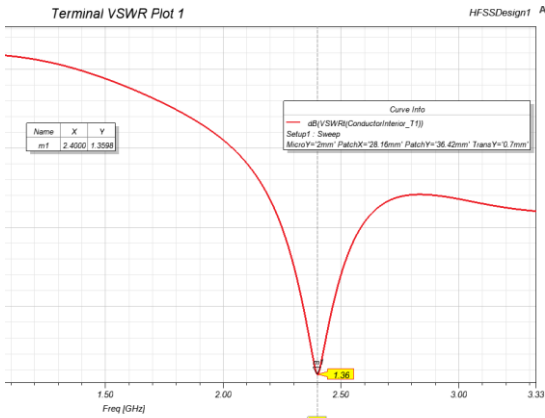


Fig. 8. Parámetro VSWR del diseño propuesto.

C. Patrón de Radiación 3D y 2D

El patrón de radiación representa gráficamente las variables de radiación de la antena. En la Figura. 9 y la Figura. 10 se muestra el patrón de radiación en 3D y 2D respectivamente con una frecuencia de excitación de 2.4 GHz, en la Figura. 9 se observa que la máxima dirección de radiación se encuentra en el eje z, esto significa que está radiando perpendicularmente al parche, debido a la orientación del lóbulo posterior es opuesta a la del lóbulo primario [21].

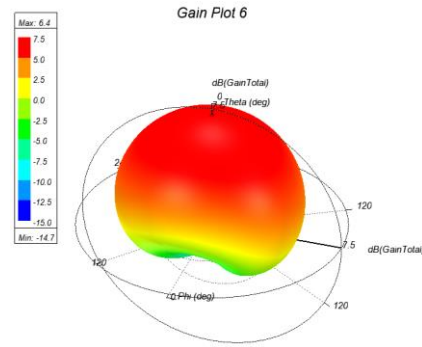


Fig. 9. Patrón de Radiación 3D del diseño propuesto.

En la Figura. 10 se observa la máxima radiación se encuentra en 1 grado aproximadamente, la intensidad de radiación va disminuyendo progresivamente en la parte inferior del eje y se observa que hay un mínimo de radiación.

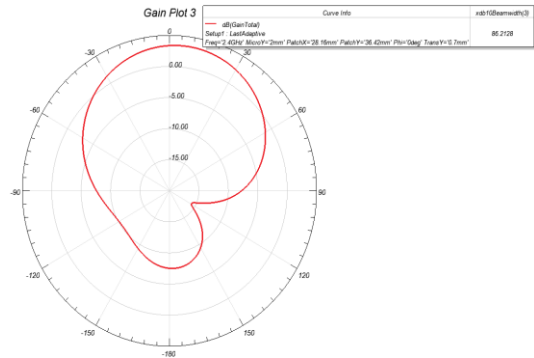


Fig. 10. Patrón de Radiación 2D del diseño propuesto.

La apertura efectiva máxima o área efectiva (A_{em}) de cualquier antena está relacionada directamente con su ganancia (G) mediante la ecuación [22], y esta expresa la porción de la potencia de una onda electromagnética que pasa a sus terminales, expresados en términos de un área equivalente.

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G (m^2) \quad (7)$$

En la Tabla II se recopila los valores captados del patrón de radiación en modo de recepción donde se obtuvo un valor de HPBW mediante el software ANSYS de 86.2° , posteriormente utilizando la ecuación 7 se obtiene un área o apertura efectiva de 54.2 m^2 de la potencia captada, teniendo una ganancia en la antena de 6,4 dB.

TABLA II. MEDIDAS DE LOS PARÁMETROS DEL PATRÓN DE RADIACIÓN EN MODO DE RECEPCIÓN.

Parámetro	Medidas
Frecuencia Resonante	2.4 GHz
Ganancia	6.4 dB
HPBW	86.2°
A_{em}	$54,2 \text{ m}^2$

El factor que determina la potencia recibida (P_r) por la antena de la señal de RF depende de la densidad de potencia irradiada del elemento transmisor y está dada por la ecuación (8), donde S es la densidad de potencia del campo en términos de $\frac{W}{m^2}$ [23].

$$P_r = S \cdot A_{em} (W) \quad (8)$$

La densidad de potencia que se tomará para obtener la potencia captada por la antena será de $0.62 \frac{mW}{m^2}$, valor estimado obtenido para lugares cercanos al punto de transmisión según [24], donde obtenemos un valor aproximado de 15 dBm, cantidad que se usara como potencia de entrada en el circuito rectificador.

E. Parámetro del Terminal Z

En la Figura. 11 se observa que la impedancia de entrada en el diseño de la antena microstrip arrojó los siguientes valores en la frecuencia de 2.4 GHz: la parte real fue de 47.27 y la parte imaginaria de 7.11, valores que indican que la antena gracias a su transformador $\lambda/4$ se encuentra adaptada a su terminal de alimentación.

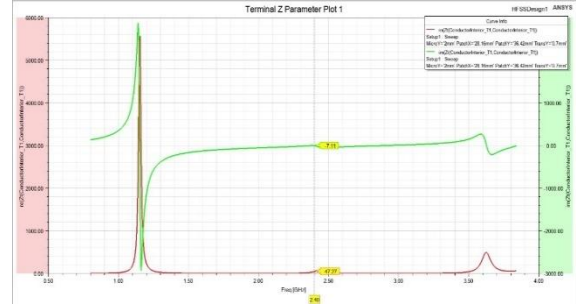


Fig. 11. Geometría de la antena microstrip tipo parche con línea microcinta.

CIRCUITO DE RECTIFICACIÓN

F. Parámetro S del circuito de rectificación

En la Figura 12 se observa que el parámetro S11 o coeficiente de reflexión esta correctamente adaptado a la frecuencia de 2.4 GHz con un valor de -20.662 dB, cabe destacar que analíticamente no se logró la adaptación del circuito a la frecuencia deseada.

Esto se debe a que no es suficiente medir la impedancia de entrada del rectificador con la antena, puesto que al momento de implementar la red de adaptación con el bloque de rectificado esta influye en el comportamiento del bloque antes mencionado lo que supone un reto al momento de realizar el diseño del circuito.

Se utiliza técnicas de análisis paramétrico, como un barrido de ciertos parámetros dentro del circuito que influyen más en el comportamiento del circuito [19], o a su vez utilizando herramientas de tuning que brinda el software de simulación.

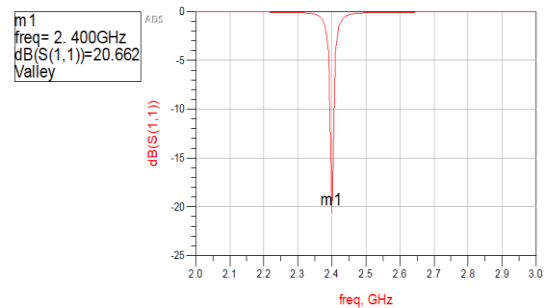


Fig. 12. Parámetro S en el circuito rectificador.

G. Parámetro VSWR del circuito de rectificación

Igual que para el caso de la antena en la Figura. 13 se observa el parámetro VSWR o la relación de onda estacionaria, donde se obtuvo un valor de 1.204 que está dentro de los parámetros aceptados que se

mencionaron anteriormente respecto a la relación de onda estacionaria (VSWR) de la antena microstrip.

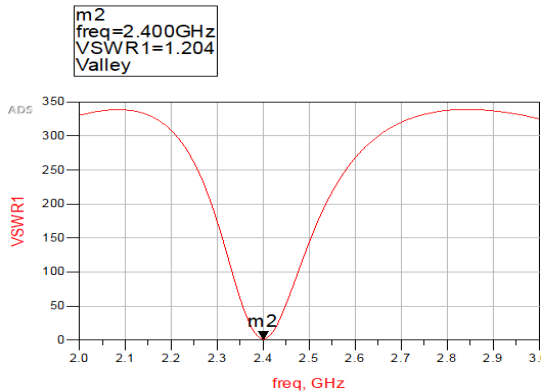


Fig. 13. Parámetro VSWR en el circuito rectificador.

G. Salida DC

En la Figura. 14 y Figura. 15 se observa el valor de voltaje y corriente respectivamente. El eje de las ordenadas indica el voltaje en la Figura 14 y la corriente en la Figura. 15 mientras que el eje de las abscisas indica el tiempo en picosegundos para ambas figuras. El voltaje de salida fue de 3.084v DC con una potencia de entrada de 15 dBm, y una corriente de 13 mA con una carga de 1 kilo ohm.

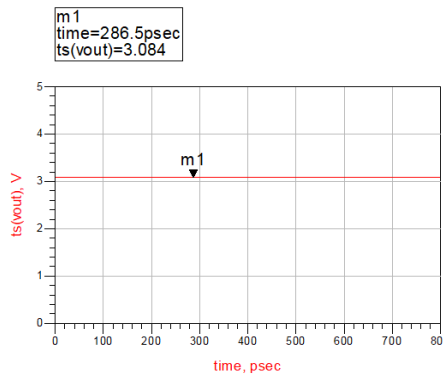


Fig. 14. Voltaje DC a la salida del circuito Rectificador.

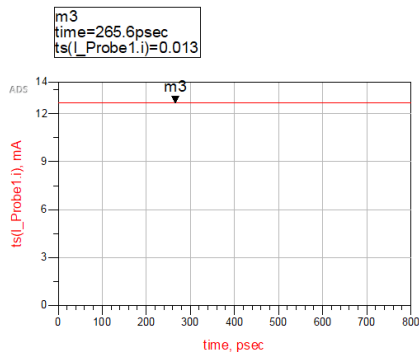


Fig. 15. Corriente de salida del circuito del rectificador

IV. CONCLUSIONES

Se diseñó una rectena para la frecuencia de 2.4 GHz, empleando el software de simulación ANSYS, obteniendo un parámetro S de -22.14541 dB, un VSWR de 1.3598. Mientras que en el circuito rectificador modelado en el software ADS se obtuvo un parámetro S de -20.662 dB, un VSWR de 1.204, y un voltaje de salida de 3V DC a una potencia de 15dBm, estos resultados obtenidos mediante la cosimulación de estos dos softwares reflejan que la antena y el circuito diseñado están completamente adaptados a la frecuencia de trabajo y las reflexiones son mínimas, garantizando así con estos valores que el rectificador reciba la mayor energía posible desde la antena y obtener así la mayor cantidad de voltaje para alimentar un sensor IoT.

Para el diseño de una red de impedancia y un circuito rectificador como el que se presenta en este artículo, se debe tomar en cuenta varios aspectos, como por ejemplo las características no lineales que insertan los elementos semiconductores como el diodo en el rectificador y el tipo de filtro utilizado en el circuito hacen que un acople de impedancias sea complejo de determinar de manera analítica, por lo cual se debe realizar además un análisis paramétrico extra para obtener un acoplamiento exitoso.

Al emplear modelos de multiplicadores de voltaje Dickson se debe tomar en cuenta ciertos factores para elegir la cantidad de etapas óptimas dentro del circuito propuesto, uno de estos factores es el rango de potencia de entrada con los que se va a trabajar, si el rango de potencias que se utilizara es alta, es preferible optar por un multiplicador de mínimo 5 etapas, mientras que para aplicaciones de baja potencia se requerirá de un máximo de 3 etapas para no afectar la corriente a la salida del circuito.

Para trabajos futuros se sugiere utilizar arreglos de microstrip para aumentar la ganancia en la antena, u otro tipo de parche que mejoren sus características, para el circuito de rectificadose se puede probar otros métodos de amplificación de voltaje que no comprometan el rendimiento del rectificado, se recomienda también el uso de diferentes tipos de filtrado que permitan aprovechar de mejor manera la señal de radio frecuencia.

V. REFERENCIAS

- [1] J. Salazar and S. Silvestre, "Internet de las cosas (IoT) - Cisco," *Cisco*, p. 34, 2017, [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/81581111.pdf>.
- [2] A. Rajawat and P. K. Singhal, "Design and analysis of a 900 MHz rectifier antenna using DGS," *Mater. Today Proc.*, vol. 29, pp. 397–407, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.293.
- [3] R. B. Ibrahim, S. H. S. B. Mohd, H. B. M. Khir, M. A. B. Zakariya, and H. Daud, "Powering LED from Wi-Fi: A qualitative assessment for rectenna design," in *2014 15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 2014, pp. 793–796, doi: 10.1109/STA.2014.7086695.
- [4] B. R. Behera, P. Srikanth, P. R. Meher, and S. K. Mishra, "A compact broadband circularly polarized printed monopole antenna using twin parasitic conducting strips and rectangular metasurface for RF energy harvesting application," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 120, p. 153233, 2020, doi: 10.1016/j.aeue.2020.153233.
- [5] V. Surducan, E. Surducan, and R. Gutt, "Harvesting and conversion of the environmental electromagnetic pollution into electrical energy by novel rectenna array coupled with resonant micro-converter," *Energy*, vol. 211, p. 118645, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118645.
- [6] D. Wang and R. Negra, "Design of a rectifier for 2.45 GHz wireless power transmission," in *PRIME 2012; 8th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics Electronics*, 2012, pp. 1–4.
- [7] I. Chaour, A. Fakhfakh, and O. Kanoun, "Enhanced Passive RF-DC Converter Circuit Efficiency for Low RF Energy Harvesting," *Sensors*, vol. 17, no. 3, 2017, doi: 10.3390/s17030546.
- [8] G. Angular and Z. Inteligente, "Panasonic - ideas for life Panasonic - ideas for life," *Europe*, vol. 2013, no. Lcd, pp. 2–3, 2010.
- [9] U. I. de Telecomunicaciones, "Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones Serie V Vocabulario y cuestiones afines," vol. 8, 2015.
- [10] D. H. Chuc and B. G. Duong, "Design and fabrication of rectifying antenna circuit for wireless power transmission system operating at ISM band," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 1522–1528, 2016, doi: 10.11591/ijece.v6i4.10287.
- [11] L.-G. Tran, H.-K. Cha, and W.-T. Park, "RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications," *Micro Nano Syst. Lett.*, vol. 5, p. 14, 2017, doi: 10.1186/s40486-017-0051-0.
- [12] A. S. Sappal, "Design of rectangular microstrip patch antenna using particle swarm optimization," 2013.
- [13] M. M. Al-Azawy and F. Sari, "Analysis of Dickson Voltage Multiplier for RF Energy Harvesting," in *2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, 2019, pp. 10–14, doi: 10.1109/GPECOM.2019.8778492.
- [14] P. Nintanavongsa, U. Muncuk, D. R. Lewis, and K. R. Chowdhury, "Design optimization and implementation for RF energy harvesting circuits," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 24–33, 2012, doi: 10.1109/JETCAS.2012.2187106.
- [15] T. Sogorb, J. V Llarío, J. Pelegri, R. Lajara, and J. Alberola, "Studying the Feasibility of Energy Harvesting from Broadcast RF Station for WSN," in *2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, May 2008, pp. 1360–1363, doi: 10.1109/IMTC.2008.4547254.

- [16] J.-P. Curty, N. Joehl, F. Krummenacher, C. Dehollain, and M. J. Declercq, "A model for μ -power rectifier analysis and design," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 52, no. 12, pp. 2771–2779, 2005, doi: 10.1109/TCSI.2005.854294.
- [17] B. R. Marshall, M. M. Morys, and G. D. Durgin, "Parametric analysis and design guidelines of RF-to-DC Dickson charge pumps for RFID energy harvesting," in *2015 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, 2015, pp. 32–39, doi: 10.1109/RFID.2015.7113070.
- [18] H. S. Park and S. K. Hong, "Broadband RF-to-DC Rectifier With Uncomplicated Matching Network," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 30, no. 1, pp. 43–46, 2020, doi: 10.1109/LMWC.2019.2954594.
- [19] D. Schemmel, "A wireless energy harvesting system with beamforming capabilities by Daniel Schemmel," *Color. Sch. Mines*, 2015.
- [20] I. B. Pauria, S. Kumar, and S. Sharma, "Design and Simulation of E-Shape Microstrip Patch Antenna for Wideband Applications," *Int. J. Soft Comput. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 275–280, 2012.
- [21] D. Fang, "Antenna Theory and Microstrip Antennas," 2009.
- [22] Ballanis, C. A. (2016). *Fundamentals Parameters and Figures-of-Merit of Antennas* (Cuarta ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Incorporated.
- [23] Marčelić, M., Ivšić, B., Jurčević, M., & Dadić, M. (2018). Estimation of energy harvesting capabilities for RF and other environmental sources. 2018 1st International Colloquium on Smart Grid Metrology, SmaGriMet 2018, 1–6. <https://doi.org/10.23919/SMAGRIMET.2018.8369855>.
- [24] Mantilla, E. E., Reyes, C. R., & Ramos, B. G. (2010). IEEE 802.11 b and g WLAN propagation model using power density measurements at ESPOL. World Academy of Science, Engineering and Technology, 93-96.