



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 20/ Edición N.39
Enero-Junio de 2023
Reia3910 pp. 1-14

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /**
Zapata Ochoa, E.; López Giraldo, F.
Transferencia de energía inalámbrica
a través de acoplamiento mutuo
usando antenas monopolo
Revista EIA, 20(39), Reia3910.
pp. 1-14.
<https://doi.org/10.24050/reia.v20i39.1619>

✉ *Autor de correspondencia:*

Zapata Ochoa, E. (Edisión)
Msc Automatización y Control
Industrial-Investigación
Correo electrónico:
edisonzapata6223@correo.itm.edu.co

Recibido: 08-07-2022
Aceptado: 12-09-2022
Disponible online: 01-01-2023

Transferencia de energía inalámbrica a través de acoplamiento mutuo usando antenas monopolo

✉ EDISON ANDRÉS ZAPATA OCHOA¹
FRANCISCO EUGENIO LÓPEZ GIRALDO¹

1. Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín

Resumen

La transferencia de energía inalámbrica mediante el acoplamiento inductivo de campo cercano se ha empleado en una serie de aplicaciones, entre ellas carga inalámbrica de dispositivos electrónicos y la alimentación de dispositivos biomédicos implantados. En estas aplicaciones, la energía se transfiere a través de distancias cortas, que son mucho más pequeñas que la longitud de onda de la operación. En estos sistemas, la eficiencia de la transferencia de potencia del enlace está relacionada de forma inversa con el rango de operación. Este artículo se centra en el diseño y la investigación de un par de antenas de microcinta de iguales dimensiones, una de estas es excitada por un pulso emitido usando GNU Radio software y USRP 2901. El par de dispositivos propuesto consta de dos monopolos con tierra defectuosa, los tamaños de 16 mm × 116 mm, que actúan como transmisor y receptor respectivamente. Los dispositivos se han diseñado, simulado y optimizados utilizando el software CST Microwave Studio. Los resultados de la corriente superficial de los dispositivos acoplados indican una buena densidad de corriente en un rango de distancia de 10 mm a 50 mm.

Palabras clave: Acoplamiento por resonancia magnética, Cosecha de energía, Transferencia de energía inalámbrica, Rectenna., Antena parche de microcinta.

Wireless power transfer via mutual coupling using monopole antennas

Abstract

Wireless power transfer using near-field inductive coupling has been employed in several applications, including wireless charging of electronic devices and powering of implanted biomedical devices. In these applications, power is transferred over short distances, which are much smaller than the operating wavelength. In these systems, the link power transfer efficiency is inversely related to the operating range. This paper focuses on the design and investigation of a pair of equal-dimensional microstrip antennas, one of which is excited by a pulse emitted using GNU Radio software and USRP 2901. The proposed pair of devices consists of two monopoles with faulty ground the sizes, 16 mm × 116 mm, which act as transmitter and receiver respectively. The devices have been designed, simulated, and optimized using CST Microwave Studio software. The surface current results of the coupled devices indicate good current density over a distance range of 10 mm to 50 mm.

Keywords: Magnetic resonance coupling, Energy harvesting, Wireless power transfer, Rectenna, Microstrip patch antenna.

1. Introduction

El concepto de transferencia de energía inalámbrica (WPT) fue introducido por Heinrich Hertz quien dio el primer ejemplo de transmisión de energía por ondas de radio y Nikola Tesla quien logro los primeros avances en WPT a principios del siglo XX (Strassner y Chang, 2013). WPT se ha clasificado como radiativa y no radiativa. La energía radiativa utiliza ondas electromagnéticas (EM) para enviar energía a grandes distancias en el rango de Km. La potencia emitida por una antena se propaga a través de un medio como el aire o el vacío. Debido a que este tipo de energía es de naturaleza omnidireccional proporciona una baja eficiencia. La energía no radiativa o (TIP), es aplicada en la transferencia de energía de corto a medio alcance, utilizando un mecanismo de acoplamiento inductivo de campo cercano o de acoplamiento por resonancia magnética basado en los principios de Nikola Tesla (Chhawchharia et al., 2018). La necesidad de alimentar el creciente número de dispositivos inalámbricos ha despertado el interés por esta área de investigación (Da Silva, Gomes Neto y Peixeiro, 2019). La capacidad de la distancia de transmisión de potencia utilizando WPT es relativamente corta esto se debe al efecto de acoplamiento de resonancia magnética que disminuye a medida que la distancia aumenta; por ende, es necesario mejorar la capacidad de distancia en el sistema de WPT. Después de una búsqueda en la literatura, se ha encontrado que la mayoría de los trabajos correspondientes a WPT utilizan dos o cuatro bobinas para mejorar la distancia de transmisión y mejorar la eficiencia del sistema (Feng, Li, y Lee 2018; H. Kim et al.

2016; Zhang et al., 2016). Ahora bien, algunos autores hacen uso de las antenas de microcinta para WPT, en este caso para mejorar la potencia de transmisión a mayor distancia, se experimenta con dos arreglos de antenas de matriz acopladas a un rectificador con un diodo HSMS-8101 con 67% de eficiencia máxima de conversión de energía, el arreglo de antenas de 4×4 logra una eficiencia de conversión de energía del 7% a una distancia de 60 cm (Y. Kim et al., 2014), otros autores realizan un conjunto de antenas microcinta de 8×8 como transmisor del mismo modo, un conjunto de 8×8 como receptor a una frecuencia de 5.8 GHz logrando una eficiencia de transmisión de potencia del 46% a una distancia de 100 cm (Yang, Geyi y Sun, 2017); otro documento presenta, el diseño de un par de dispositivos de tamaño desigual integrados en un parche de microcinta en forma de bobinas formando una espira cuadrada. Los resultados de las mediciones muestran que el dispositivo se acopla a una distancia entre un máximo de 30 mm con un rendimiento del 54,5%, también se mide el rendimiento de este dispositivo realizando una desalineación lateral y angular, se puede alcanzar una máxima transferencia de energía a una distancia de 10 mm con la variación de 0° a 40° para una frecuencia de trabajo de 19.5 a 20.4 MHz (Mohd Salleh et al., 2017) acting as a transmitter and receiver, respectively. The devices are designed, simulated and optimized using the CST Microwave Studio software prior to being fabricated and verified using a vector network analyzer (VNA. Este documento, investiga el efecto de las antenas de microcinta para WPT a una frecuencia de operación de 900 MHz. Se proponen dos antenas monopolo con ranura tipo mancuerna (Khandelwal, Kanaujia, y Kumar, 2017), en el plano de tierra para mejorar el patrón de radiación y así mejorar la distancia de transmisión y mejorar la eficiencia energética para aumentar el rendimiento del sistema WPT.

2. Principios básicos de un sistema WPT de rango medio

2.1. Acoplamiento mutuo

Es definido como la interacción electromagnética entre el sistema de elementos de una matriz donde autoinductancia del transmisor y autoinductancia del receptor. Este análisis se discute en (Strassner y Chang 2013; Zhong y Hui, 2014). La inductancia mutua se describe como:

$$M = K\sqrt{(L_{1x} L_2)} \quad (1)$$

Donde K es el coeficiente de acoplamiento representado por la distancia del Transmisor (Tx) y el receptor (Rx) y se define como:

$$K_{xy} = M_{xy}/\sqrt{L_{xy}} \quad (2)$$

2.2. Eficiencia de transferencia de potencia

La eficiencia de transferencia de potencia (PTE) está relacionada con los parámetros S de dispersión. La eficiencia de PTE es representado por el S₂₁, debido a que, el sistema WPT contiene una red de dos puertos. Esta red se representa como la entrada que es alimentada en la fuente mientras que la otra es la salida que alimenta la carga. Los parámetros S, se define en PTE como $\eta = |S_{21}|^2$ cuando la red coincide en ambos puertos (Yu et al., 2013).

El acoplamiento mutuo principalmente se realiza con estructuras en espira o bobinas, sin embargo, estos cálculos se pueden utilizar en antenas planares. El PTE es un elemento clave para calcular factor de calidad (Q) de la bobina primaria (Q_p) y (Q_s) en la bobina secundarias o Tx y Rx, el acoplamiento mutuo reacciona a la función de alineación y a la distancia entre estas; la eficiencia de la potencia se define como:

$$\eta = K^2 Q_p Q_s / 1 + K^2 Q_p Q_s \quad (3)$$

El parámetro puede definirse como la señal que sale por el puerto de salida y la señal incidente en el puerto de entrada, que se expresa como:

$$S_{21} = 2 V_L / V_s \sqrt{R_s / R_L} \quad (4)$$

Donde R_L y R_s es la resistencia en cada bobina.

El parámetro S₁₁ representa el coeficiente de reflexión del puerto 1 y el S₂₁ es el coeficiente de transmisión del puerto 2 al puerto 1 en un sistema de WPT este se puede expresar como:

$$S_{11} \text{ (dB)} = 20 \log S_{11} \quad (5)$$

$$S_{21} \text{ (dB)} = 20 \log S_{21} \quad (6)$$

A partir de la ecuación (5), la relación de reflexión de la potencia, puede expresarse como:

$$\eta_{11} = |S_{11}|^2 \times 100\% \quad (7)$$

Así, el PTE del sistema está representado por η_{21} como:

$$\eta_{21} = |S_{21}|^2 \times 100\% \quad (8)$$

3. Diseño de la antena

El modelado y análisis del sistema WPT se llevó a cabo utilizando el software de simulación CST Microwave Studio. Las antenas diseñadas para este sistema se han construido como se muestra en la figura 1. Se presenta una estructura monopolo rectangular, alimentada por una línea de microcinta acoplada a 50Ω que a su vez fabricada esta acoplada al conector Jack sma hembra, las características del substrato utilizado son FR4 de constante dieléctrica = 4.3, con pérdidas tangenciales = 0.025, espesor de dieléctrico = 1.6 mm, altura del cobre = 0.035.

Mediante el software CST se optimiza el diseño utilizando la función de barrido paramétrico para lograr las dimensiones finales.

Las antenas planas monopolo de placa metálica tienen la característica de tener un ancho de banda de impedancia muy amplio (Burrus y T Bell Laboratories, 1993; Ammann y Chen, 2003). Sin embargo, para frecuencias de funcionamiento más altas, los diagramas de radiación omnidireccionales o casi omnidireccionales generalmente no pueden lograr ganancias mayores a 3 dB (Anob, Ray, y Kumar, 2001). Esto se debe a que, para lograr un ancho de banda de impedancia muy amplio, el monopolo generalmente se diseña para tener un ancho de banda grande, que generalmente es mayor que un cuarto de longitud de onda de la frecuencia de operación más alta.

Figura 1. 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, y finalmente en el plano de tierra se realiza una inserción de ranura tipo mancuerna para ajustar a la frecuencia deseada.

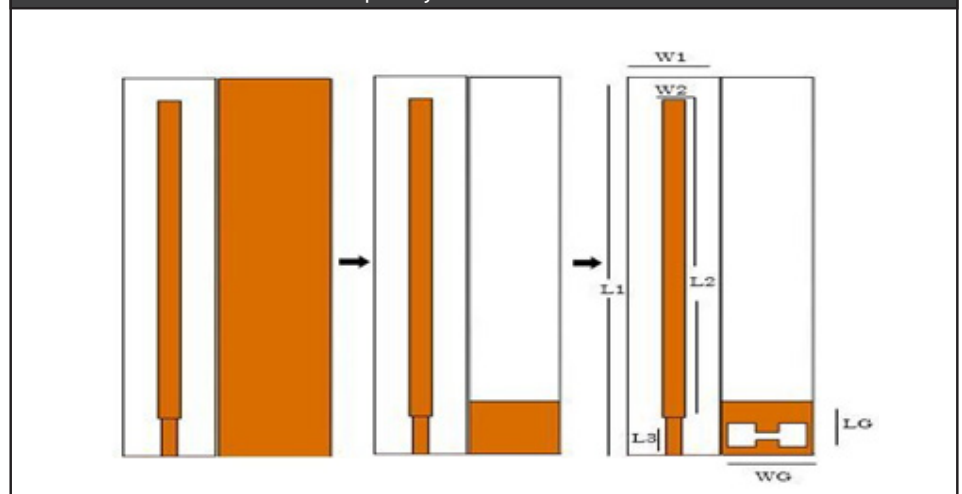


Tabla 1. Dimensiones de la antena monopolo

Parámetro	Dimensión(mm)
L1	116
W1	16
L2	97.50
W2	4
L3	11.50
LG	11
WG	16

Figura 2. Coeficiente de reflexión (S11) de la antena propuesta.

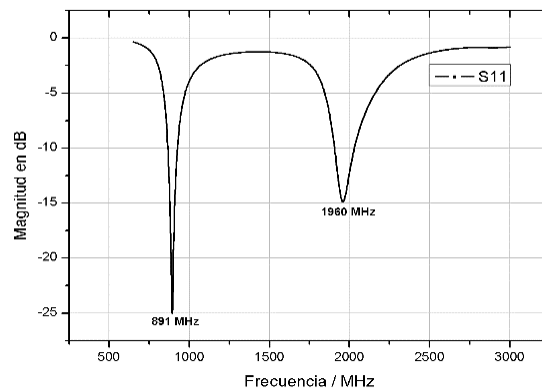
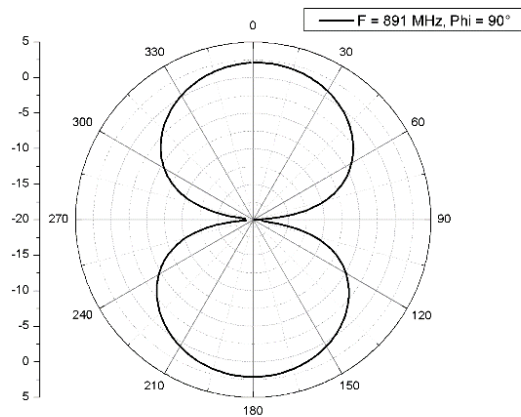


Figura 3. Patrón de radiación de la antena propuesta en 891 MHz.



4. Resultados de la simulación

El tamaño del modelo es similar para las antenas Tx y Rx inicialmente se realiza la medición a una distancia de 100 mm disminuyendo la distancia hasta hallar la distancia óptima en la cual se produce el acoplamiento mutuo, esto se ha logrado a una distancia de 50 mm. La figura 5. presenta la simulación del acoplamiento inductivo a 50 mm de distancia. El sistema WPT de la figura 4. es conocido como un sistema de dos puertos, los parámetros S_{11} y S_{22} son los que determinan el análisis de este sistema, siendo S_{11} quien suministra la cantidad de potencia y representa la potencia transferida, la relación entre la señal de salida y la señal incidente se aprecia en la figura 5. Los resultados de la simulación muestran que los parámetros S de la figura 5. ubican el S_{11} en -24.7 dB, a una frecuencia de operación de 891 MHz, mientras que el parámetro S_{22} se encuentra en -5.8 dB a la frecuencia de 891 MHz. Este resultado muestra que la potencia transmitida a una distancia de 50 mm no alcanza a llegar al 1%.

Mediante el software CST Studio se puede apreciar que S_{11} emite 0.1 W y S_{22} recibe 0.15819 a una distancia de 50 mm y a una frecuencia de operación de 891 MHz (figura 6). Así mismo, en la figura 7 se aprecia el VSWR de cada diseño propuesto el cual debe estar entre un valor de 1 y 2 para un rendimiento eficiente de una antena (Kamo et al., 2012).

Figura 4. Proceso de simulación de transferencia de energía por acoplamiento. Partiendo de una distancia de 100 mm de separación el Rx se acerca al Tx hasta una distancia de 50 mm donde se produce el acoplamiento mutuo.

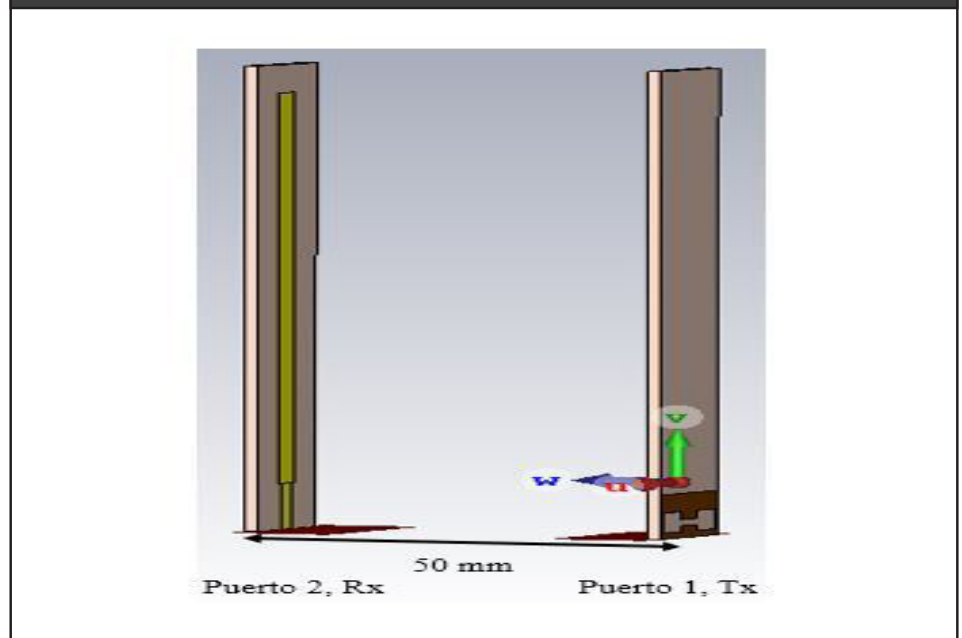


Figura 5. Simulación del Coeficiente de reflexión, acoplamiento mutuo S11 del Tx en la frecuencia de 891 MHz, S21 del Rx en -5.8 dB.

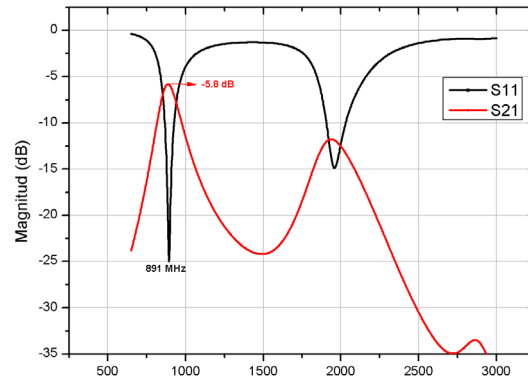


Figura 6. Potencia emitida desde el puerto 1 = 0.1W ~ 20dBm emitidos por la tarjeta USRP, potencia recibida por el puerto 2 = 0.158 mV, debido al acoplamiento mutuo.

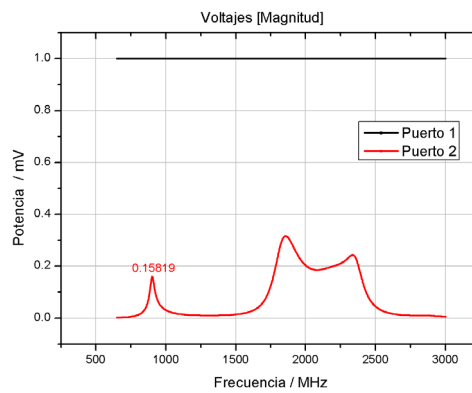
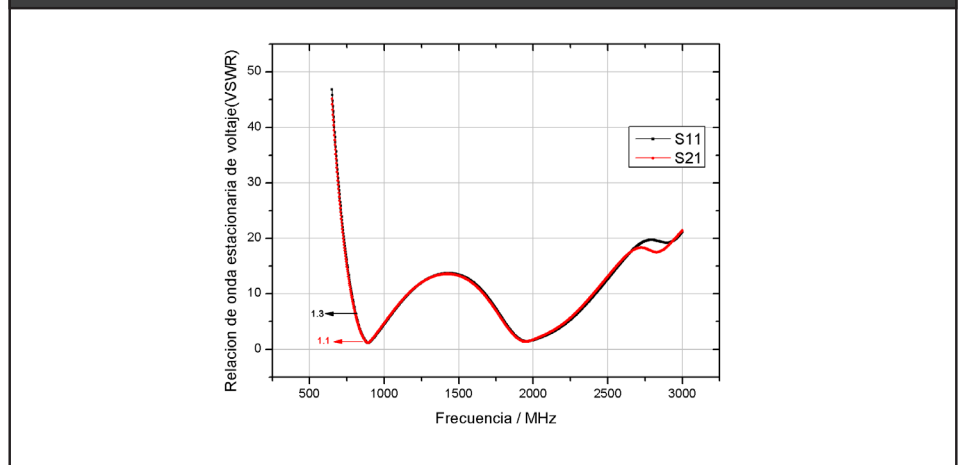


Figura 7. Simulación del VSWR para la frecuencia de 891 MHz del Tx y Rx.

4.2. Diseño del rectificador

Este rectificador utiliza la tecnología PCB es fácil de integrar con circuitos impresos y las antenas pueden ser diseñadas para operar en múltiples bandas de frecuencia (Lu et al., 2016). Los rectificadores basados en la tecnología CMOS son compactos y tienen la capacidad de trabajar a potencias de entradas bajas, sólo operan en una sola banda (Li y Lee, 2014). Se diseña un rectificador simple de triple banda basado en tecnología PCB con el mismo sustrato FR4 y mismas propiedades del material utilizado en el diseño de las antenas propuestas. El diseño del rectificador se muestra en la figura 8, la simulación de los coeficientes de reflexión en la figura 9 y el rectificador fabricado figura 10. La simulación presento como resultado frecuencias de operación en 920, 1430 y 2968 MHz. El rectificador se compone de una red de adaptación de impedancia utilizando una línea de transmisión en forma de T (Nikravan y Atlasbaf, 2011), un diodo Schotkky HSMS-286C el cual es adecuado para aplicaciones de baja potencia con un umbral de ruptura entre 0.15 V y 3.8V. 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 mover la frecuencia fundamental a la de operación deseada. La simulación también se realiza con el software CST Studio. Se logran tres bandas de operación en 920, 1430 y 2968 MHz. Además, se agrega un condensador de farad tipo H, de doble capa, 5.5V, 1F, para almacenar la potencia transmitida de la antena Tx. A pesar de que el rectificador es de dimensiones grandes es útil para realizar este experimento; sin embargo, se considera para próximos trabajos la miniaturización de este tipo de rectificadores.

Figura 8. Diseño del rectificador propuesto.

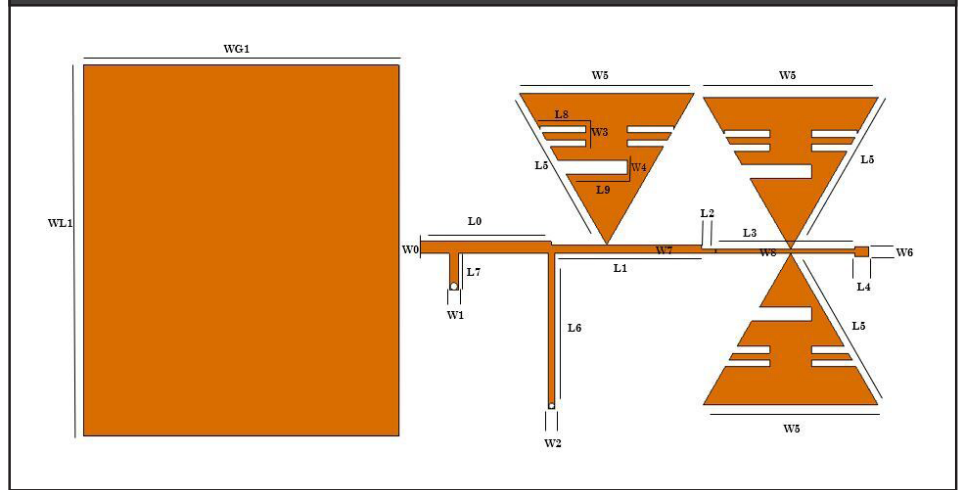
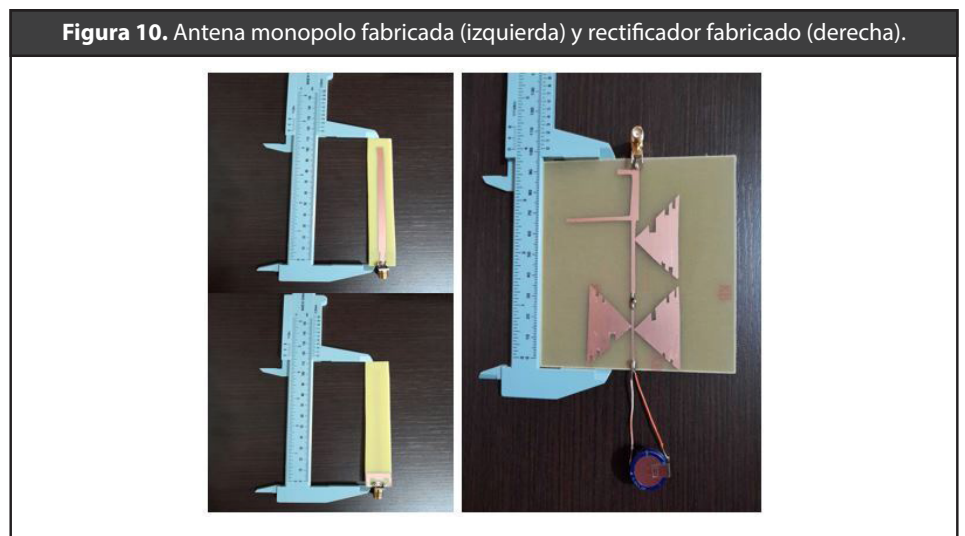
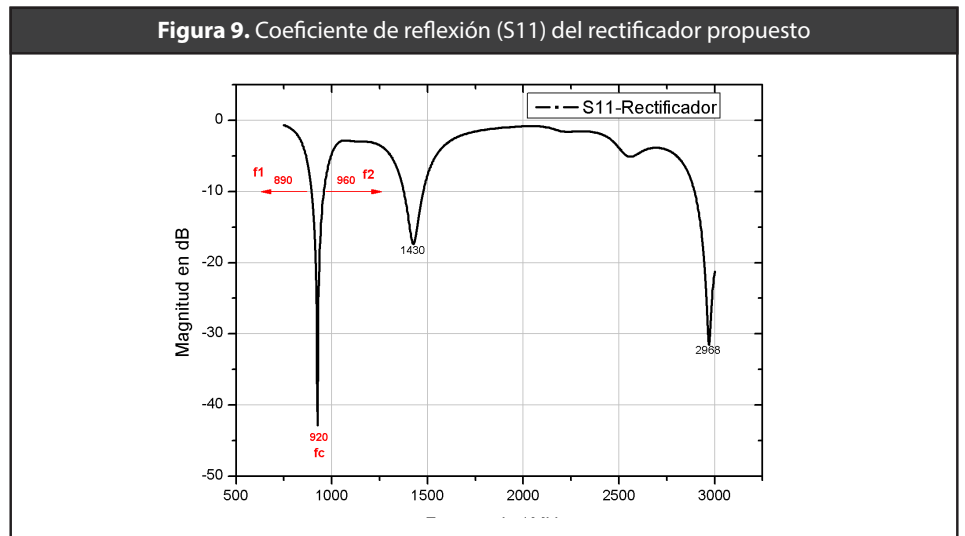


Tabla 2. Dimensiones del rectificador propuesto (mm).

Parámetro	Dimensión	Parámetro	Dimensión.
L0	28.7	W0	2.64
L1	35	W1	2
L2	3.05	W2	1.4
L3	30.25	W3	1.5
L4	3	W4	3
L5	37.41	W5	38.11
L6	33.80	W6	2.20
L7	8	W7	2.20
L8	10	W8	1.5
L9	14.55	WG1	10
WL1	10	-	-

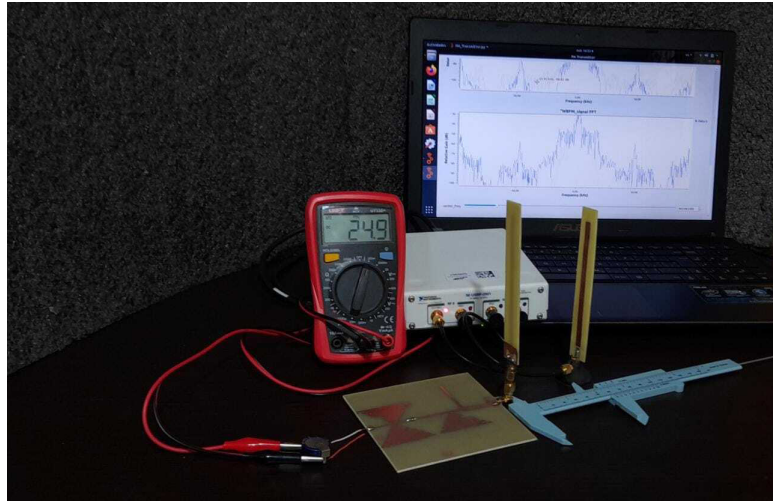


4.3. Medición experimental

Para llevar a cabo este experimento se utiliza el software GNU Radio (Selva et al., 2012) the use of digital technologies is very relevant. Digital communication systems have proven their efficiency and brought a new element in the chain of signal transmitting and receiving, the digital processor. This device offers to new radio equipments the flexibility of a programmable system. Nowadays, the behavior of a communication system can be modified by simply changing its software. This gave rising to a new radio model called Software Defined Radio (or Software-Defined Radio - SDR, la tarjeta USRP-290 para generar una señal de 900 MHz hacia la antena Tx con una potencia máxima permitida por la USRP de 20 dBm = 0.1 W. El Rx es combinado con el rectificador para visualizar la potencia recibida, esta combinación se conoce como rectenna. El sistema de medición se presenta en la figura

11, la distancia de separación entre las antenas propuestas es de 50 mm; cuando la distancia entre las antenas es de 50 mm se observa que en la distancia simulada efectivamente se realiza el acoplamiento inductivo con 24.9 mV de energía reciclada.

Figura 11. Transferencia de energía inalámbrica a 50 mm el capacitor almacena 24.9 mV en un tiempo de 40 minutos.



5. Discusión y Conclusiones

En este documento se analiza y compara teóricamente un sistema WPT entre dos antenas monopolo basándose en la teoría de las bobinas, se proponen dos antenas monopolo debido a su sencillez de construcción. Los resultados experimentales y de simulación confirman que no solo las bobinas pueden funcionar para sistemas de WPT. Se propone una solución simple y de bajo costo para carga de dispositivos de bajo consumo de potencia.

La antena monopolo es de bajo costo y tiene un desempeño para frecuencias de 890 a 2900 MHz. Tienen una ganancia de antena de 2.13 a 3.31 dB.

La ventaja de las antenas de microcinta es pequeña y liviana.

Debido a que, el ejercicio experimental no se realiza dentro de una cámara anecoica, cabe la posibilidad de que otras frecuencias existentes en el ambiente como ondas de radio y TV puedan resonar en el Rx y esto genera que la antena este reciclado más energía por parte de otros medios, es de ahí la diferencia de carga recibida frente a la simulación.

6. Referencias

- Ammann, M. J., and Zhi Ning Chen. 2003. "Wideband Monopole Antennas for Multi-Band Wireless Systems." *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 45(2): 146–50. <https://doi.org/10.1109/map.2003.1203133>
- Anob, P. V., K. P. Ray, and G. Kumar. 2001. "Wideband Orthogonal Square Monopole Antennas with Semi-Circular Base." *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest) 3*: 294–97. <https://doi.org/10.1109/aps.2001.960090>
- Burrus, C A A T, and T Bell Laboratories. 1993. "M. Hammoud, P. Poey and F. Colombel." 29(4). <https://doi.org/10.1049/el:19930272>
- Chhawchharia, Saransch et al. 2018. "Investigation of Wireless Power Transfer Applications with a Focus on Renewable Energy." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91(April): 888–902. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.101>
- Da Silva, Erik Farias, Alfredo Gomes Neto, and Custódio Peixeiro. 2019. "Fast and Accurate Rectenna Design Method." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 18(5): 886–90. <https://doi.org/10.1109/lawp.2019.2904795>
- Feng, Junjie, Qiang Li, and Fred C. Lee. 2018. "Coil and Circuit Design of Omnidirectional Wireless Power Transfer System for Portable Device Application." *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2018*: 914–20. <https://doi.org/10.1109/ecce.2018.8557465>
- Kamo, Bexhet, Shkelzen Cakaj, Vladi Koliçi, and Erida Mulla. 2012. "Simulation and Measurements of VSWR for Microwave Communication Systems." *Network and System Sciences* 5: 767–73. <http://dx.doi.org/10.4236/ijcns.2012.511080> Published Online November 2012 (April 14, 2021). <https://doi.org/10.4236/ijcns.2012.511080>
- Khandelwal, Mukesh Kumar, Binod Kumar Kanaujia, and Sachin Kumar. 2017. "Defected Ground Structure: Fundamentals, Analysis, and Applications in Modern Wireless Trends." *International Journal of Antennas and Propagation* 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2018527>
- Kim, Hongseok et al. 2016. "Coil Design and Measurements of Automotive Magnetic Resonant Wireless Charging System for High-Efficiency and Low Magnetic Field Leakage." : 1–18. <https://doi.org/10.1109/wpt.2015.7140180>
- Kim, Youngsub, Young Joong Yoon, Jinwoo Shin, and Joonho So. 2014. "X-Band Printed Rectenna Design and Experiment for Wirelss Power Transfer." In *IEEE Wireless Power Transfer Conference 2014, IEEE WPTC 2014*, IEEE Computer Society, 292–95. <https://doi.org/10.1109/wpt.2014.6839566>

- Li, Cheng Jyun, and Tai Cheng Lee. 2014. "2.4-GHz High-Efficiency Adaptive Power." *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems* 22(2): 434–38. <https://doi.org/10.1109/tvlsi.2013.2238264>
- Lu, Jia Jun, Xue Xia Yang, Huan Mei, and Chong Tan. 2016. "A Four-Band Rectifier with Adaptive Power for Electromagnetic Energy Harvesting." *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 26(10): 819–21. <https://doi.org/10.1109/lmwc.2016.2601294>
- Mohd Salleh, Mohd Hidir, Norhudah Seman, Dyg Norkhairunnisa Abang Zaidel, and Akaa Agbaeze Eteng. 2017. "Investigation of Unequal Planar Wireless Electricity Device for Efficient Wireless Power Transfer." *Radioengineering* 26(1): 251–57. <https://doi.org/10.13164/re.2017.0251>
- Nikravan, M. A., and Z. Atlasbaf. 2011. "T-Section Dual-Band Impedance Transformer for Frequency-Dependent Complex Impedance Loads." *Electronics Letters* 47(9): 551–53. <https://doi.org/10.1049/el.2010.7452>
- Selva, A. F.B. et al. 2012. "Introduction to the Software-Defined Radio Approach." *IEEE Latin America Transactions* 10(1): 1156–61. <https://doi.org/10.1002/0470867728.part1>
- Strassner, Bernd, and Kai Chang. 2013. "Microwave Power Transmission: Historical Milestones and System Components." *Proceedings of the IEEE* 101(6): 1379–96. <https://doi.org/10.1109/jproc.2013.2246132>
- Yang, Xiaodong, Wen Geyi, and Hucheng Sun. 2017. "Optimum Design of Wireless Power Transmission System Using Microstrip Patch Antenna Arrays." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 16: 1824–27. <https://doi.org/10.1109/lawp.2017.2682262>
- Yu, Xiaofang et al. 2013. "Wireless Power Transfer in the Presence of Metallic Plates: Experimental Results." *AIP Advances* 3(6): 0–9. <https://doi.org/10.1063/1.4809665>
- Zhang, Wei, Jeff C White, Rajesh K Malhan, and Chunting Chris Mi. 2016. "Loosely Coupled Transformer Coil Design to Minimize EMF Radiation in Concerned Areas." *XX(X)*. <https://doi.org/10.1109/tvt.2016.2535272>
- Zhong, Wenxing, and S Y R Hui. 2014. "Maximum Energy Efficiency Tracking for Wireless Power Transfer Systems." 8993(c). <https://doi.org/10.1109/tpel.2014.2351496>