

ANTENA PARA COSECHA DE ENERGÍA DENTRO Y FUERA DE BANDA EN RADIOFRECUENCIA DE 2.4 GHZ

ANTENNA FOR ENERGY HARVESTING WITHIN AND OUT OF BAND IN RADIOFREQUENCY OF 2.4 GHZ

Miguel Ángel Martínez Hernández

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
miguelangelmtzh@hotmail.com

Armando Arce Casas

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
armando.arce@uaslp.mx

Enrique Stevens Navarro

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
estevens@fc.uaslp.mx

Marco Aurelio Cárdenas Juárez

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
mcardenas@fc.uaslp.mx

Ulises Pineda Rico

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
u_pineda@fc.uaslp.mx

Recepción: 17/octubre/2019

Aceptación: 23/noviembre/2019

Resumen

La cosecha de energía en las bandas de radiofrecuencia (RF) es una solución prometedora para lograr sistemas de comunicación inalámbricos energéticamente auto-sustentables. La cosecha de energía busca captar energía del entorno que pueda ser recolectada y utilizada para alimentar dispositivos electrónicos. En este trabajo se analizan las oportunidades de cosecha de energía en RF dentro y fuera de la banda ISM de 2.4 GHz a través del diseño y simulación una de antena F-invertida impresa (PIFA). Se utiliza información de la energía disponible en el espectro en la banda de 1800 a 2600 MHz por medio de una campaña de medición espectral en la ciudad de San Luis Potosí. Al analizar el ancho de banda de la antena se logra estimar la cantidad de energía de RF que pudiera ser cosechada dentro y fuera de la banda ISM de 2.4 GHz en el rango de 2 a 3 GHz.

Palabras Claves: Cosecha de energía, diseño de antena F-invertida impresa, radiofrecuencia.

Abstract

Energy harvesting in the radio frequency (RF) bands is a promising solution to achieve self-sustaining energy-efficient wireless communication systems. The energy harvesting seeks to capture energy from the environment that can be collected and used to power electronic devices. This paper analyzes the opportunities for harvesting energy in RF inside and outside the 2.4 GHz ISM band through the design and simulation of a printed inverted F antenna (PIFA). Information on the energy available in the spectrum in the 1800-2600 MHz band is used through a spectral measurement campaign in the city of San Luis Potosí. By analyzing the bandwidth of the antenna, it is possible to estimate the amount of RF energy that could be harvested inside and outside the 2.4 GHz ISM band in the 2-3 GHz range.

Keywords: Energy harvesting, printed inverted F antenna design, radiofrequency.

1. Introducción

En la actualidad, los sistemas de comunicación inalámbricos que incorporen procesos energéticamente auto-sustentables son de los temas más importantes para la electrónica de baja potencia en ambientes inteligentes (como el Internet de las Cosas, Ciudades Inteligentes, Sistemas Transporte Inteligentes, etc.). En este sentido, las técnicas para lograr cosecha de energía a partir de las fuentes de energía ambiental, tales como la vibración, el calor y las ondas electromagnéticas es un área de investigación muy actual [Kim, 2014], [Vandelle, 2019].

Diversos sistemas de cosecha de energía en diferentes frecuencias del espectro electromagnético se han enfocado en la electrónica sustentable de cero consumos de potencia principalmente en la banda de la luz visible (luz solar) y en el infrarrojo. Sin embargo, en los últimos años, gran atención de investigación se ha centrado en las bandas de radiofrecuencia (RF) generalmente utilizadas para diferentes sistemas de comunicación [Srinivasu, 2019].

El concepto de cosecha de energía inalámbrica se puede rastrear hasta los primeros trabajos de las comunicaciones inalámbricas por parte de los pioneros en el área como Nikola Tesla y Heinrich Hertz [Srinivasu, 2019]. El objetivo era radiar potencia inalámbrica hacia el espacio libre para después recuperar esa potencia en forma de corriente directa (CD) utilizable. La cosecha de energía inalámbrica en RF tiene un amplio potencial para reducir sustancialmente el número de baterías, así como para extender considerablemente la vida útil de las mismas.

La idea principal de la cosecha de energía es captar energía de RF del entorno, donde la energía recolectada se puede utilizar para dispositivos electrónicos de pequeño voltaje [Kim, 2014]. Inicialmente, para detectar la energía de RF del entorno se requiere de antenas, como parches con características de banda ultra ancha [Zhao, 2017]. Sin embargo, también se pueden utilizar antenas de banda estrecha, dependiendo de las bandas de frecuencia que se quieran detectar. Por ejemplo, para detectar las frecuencias de la banda de GSM 900 (900 MHz) [IFT, 2019] se necesita de una antena con características de banda estrecha.

En este trabajo se exploran y analizan las oportunidades de cosecha de energía en RF de dispositivos inalámbricos dentro y fuera de banda a través del diseño de una antena para la banda de radio para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM, por sus siglas en inglés) de los 2.4 GHz [IFT, 2019]. Actualmente, dispositivos de última generación de comunicaciones inalámbricas tales como: teléfonos celulares inteligentes incluyen sistemas de múltiples antenas y múltiples transceptores. El uso típico de un dispositivo de este tipo aprovecha un subconjunto de los sistemas de antenas y transceptores disponibles en un momento dado. Además, las cadenas de RF en el receptor en uso usualmente filtran las energías fuera de banda para mejorar las prestaciones del sistema de comunicación. Estas energías fuera de banda podrían recolectarse a través del diseño de sistemas de una sola antena o múltiples antenas, que pueden encontrarse incluso en dispositivos básicos tales como en nodos de sensores inalámbricos [Rocke, 2015]. Así, en el presente trabajo de investigación las oportunidades de cosechar energía dentro y fuera de banda son investigadas. La investigación utiliza datos recolectados de una campaña de medición de utilización del espectro en la ciudad de San Luis

Potosí, así como simulaciones electromagnéticas en el diseño de antenas para proporcionar información sobre las oportunidades de cosecha de energía en RF.

2. Métodos

Aunque existen una gran cantidad de tecnologías y dispositivos inalámbricos transmitiendo y recibiendo información en el espectro de radiofrecuencias, la oportunidad real de cosechar energía de RF ambiental depende en gran medida de lo que esté disponible en un determinado lugar y periodo de tiempo. Para tener una idea más definida de la posible distribución de energía disponible se analizan los datos correspondientes a una extensiva campaña de medición de ocupación/utilización espectral de la banda de los sub-6 GHz realizada en la ciudad de San Luis Potosí en 2018 [Arista, 2018]. Para efectos del presente trabajo sólo se consideran los datos de medición de potencia correspondientes entre los 1800 MHz y los 2600 MHz que incluyen la banda ISM de los 2.4 GHz.

Campaña de Medición y Potencia por Bandas

Los datos de mediciones de potencia fueron adquiridos mediante una plataforma de medición espectral que consta de: una antena omnidireccional AOR DA3200, dicha antena está diseñada para las frecuencias de 35 – 3000 MHz, un filtro pasa baja (Minicircuits VLF-3000), un amplificador de bajo ruido (Minicircuits ZX60-8008E+) y un analizador de espectro portátil Tektronix RSA306, el cual está especificado para frecuencias hasta 6.2 GHz, el cual se controla por medio del programa Matlab desde una laptop como se muestra en la figura 1. Es importante mencionar que el amplificador utilizado permite mejorar la fidelidad y sensibilidad del proceso de medición. Detalles adicionales sobre la plataforma de medición se pueden consultar en [Arista, 2018] y en [López, 2014]. Se consideran únicamente los datos de mediciones de potencia obtenidos en dos ubicaciones dentro de la Ciudad de San Luis Potosí:

- **Ubicación 1:** Zona Universitaria Zona Poniente (Latitud: 22.142678- Longitud: -101.01576 - Altitud: 1,897m).

- **Ubicación 2:** Edificio Central de la UASLP en Centro Histórico (Latitud: 22.152556 - Longitud: -100.97799 - Altitud: 1,874 m).

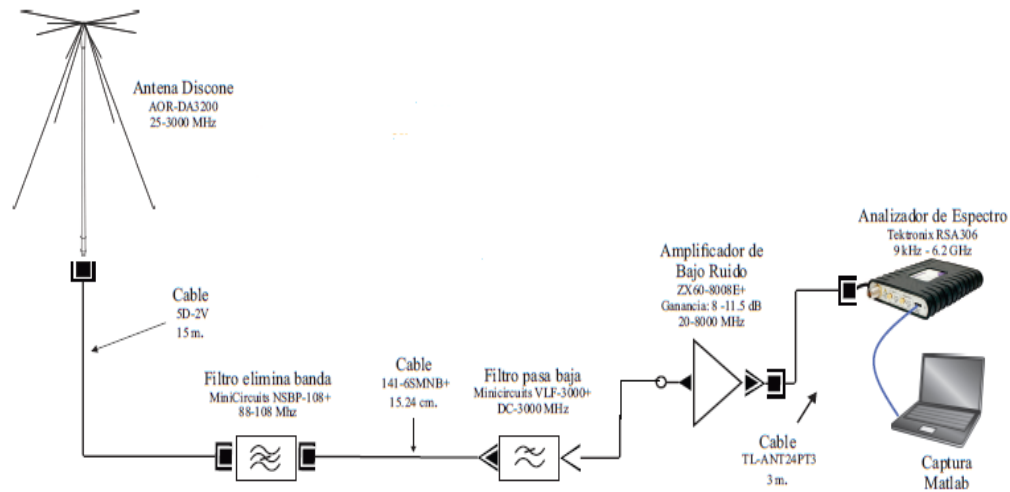


Figura 1 Plataforma de medición espectral.

Tanto la ubicación 1 y la ubicación 2 se encuentran en zonas urbanas de la ciudad con una densidad de población (fija y flotante) muy alta y con muchos establecimientos comerciales, de servicios financieros, de oficinas gubernamentales y de centros educativos de diversos niveles, figura 2.

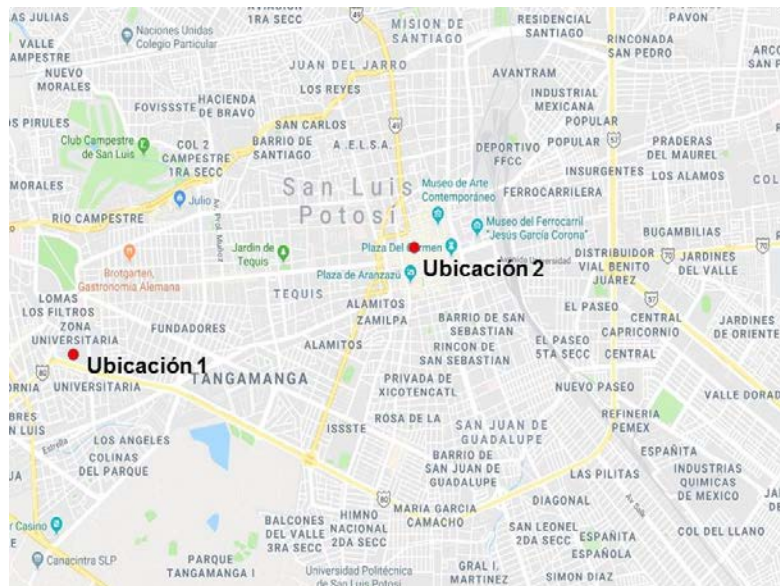


Figura 2 Ubicación de los puntos geográficos donde se tomaron muestras.

La plataforma de medición es montada en cada ubicación para recolectar muestras de potencia del espectro durante tres días laborales completos. Por tanto, se tienen 72 horas ininterrumpidas de muestras periódicas de potencia del espectro en cada ubicación.

Posteriormente, se calcula el valor promedio de potencia en cada muestra de frecuencia durante el intervalo completo de 72 horas.

Los rangos de frecuencia considerados en este estudio se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Bandas consideradas.

Banda	Frecuencia (MHz)	Uso (más importante)
1	1800 - 1900	Telefonía Celular
2	1900 - 2000	Telefonía Celular
3	2000 - 2100	
4	2100 - 2200	Telefonía Celular
5	2200 - 2300	
6	2300 - 2400	
7	2400 -2500	ISM
8	2500 - 2600	

Se consideraron intervalos de ancho de banda de 100 MHz y se menciona su uso más importante de acuerdo al Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias del Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) [IFT, 2019].

Finalmente, la figura 3 muestra los valores de potencia promedio (azul) y máxima (naranja) obtenidos para cada frecuencia en el rango correspondiente de los 1800 MHz a los 2600 MHz quedando incluido la banda ISM de los 2.4 GHz. La sub-figura superior corresponde a Zona Universitaria Poniente (Ubicación 1) y la sub-figura inferior corresponde a la Edificio UASLP en Zona Centro (Ubicación 2).

Es importante notar en la figura 3 que la actividad en este intervalo de frecuencias está muy focalizada en las sub-bandas de frecuencia asignadas para telefonía móvil como 1800/1900 MHz así como 2100/2200 MHz.

También se puede ver actividad en la sub-banda ISM de los 2.4 GHz donde operan sistemas de comunicación de área local y personal como Wi-Fi y Bluetooth, respetivamente.

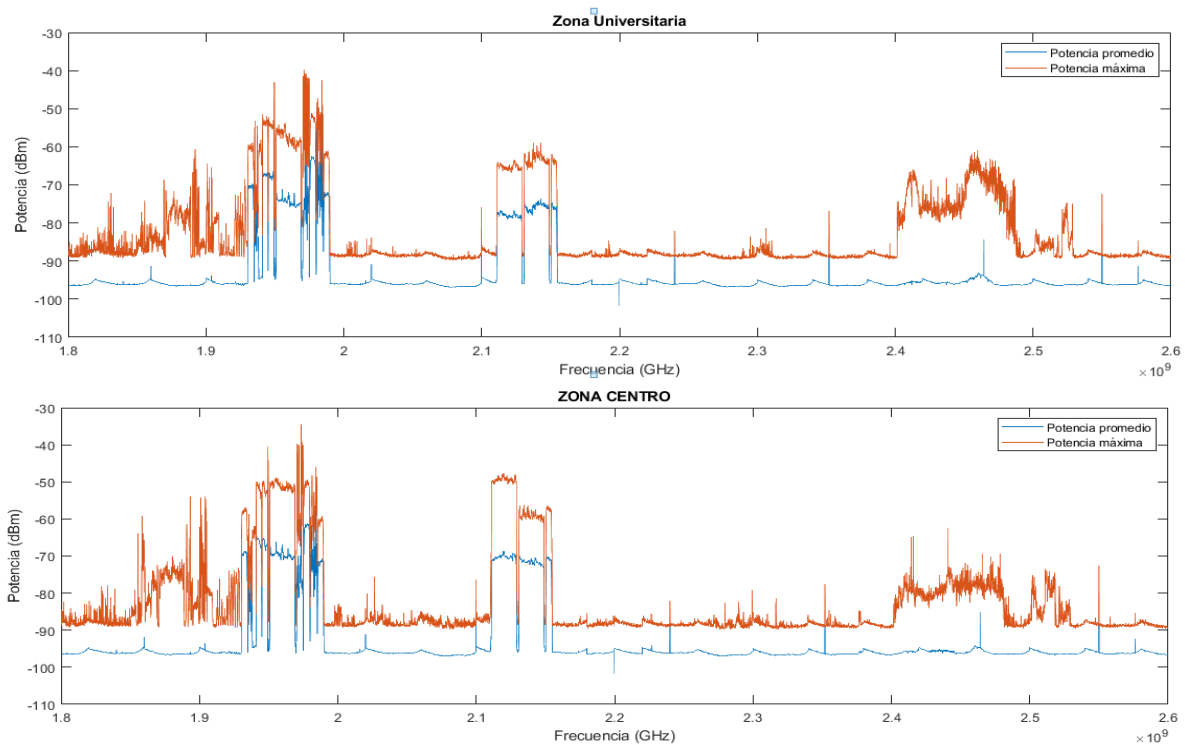


Figura 3 Resultados de potencia recibida en dBm (promedio y máxima).

Parámetros Fundamentales de Antena para Cosecha de Energía

Para describir y entender las características o prestaciones que puede tener una antena en la recolección de energía de radiofrecuencia, se requiere definir algunos parámetros. Estos parámetros en general están interrelacionados y no todos deben ser especificados para una completa descripción de las prestaciones de la antena. Así, en esta sección, se enumeran y describen los parámetros de antena relacionados con el presente trabajo:

- **Frecuencia de resonancia:** Una antena es una forma de circuito sintonizado que consiste en una inductancia y una capacitancia, y como resultado tiene una frecuencia de resonancia u operación (frecuencia en la cual la antena es diseñada para la captación de energía). Esta es la frecuencia donde las reactancias inductivas y capacitivas se anulan entre sí. En este punto la antena parece puramente resistiva, siendo la resistencia una combinación de la resistencia por pérdida y resistencia por radiación [Balanis, 1997].
- **Pérdida por retorno (S_{11}):** En general, los parámetros S describen la relación entrada-salida entre los puertos o terminales en un sistema eléctrico.

En la práctica, el parámetro más común en lo que se refiere a antenas es el parámetro S11. El parámetro S11 representa cuánta potencia es reflejada por la antena, y por lo cual es conocido también como coeficiente de reflexión o pérdida por retorno. Si por ejemplo, se tiene un valor de S11=-10 dB, implica que si 3 dB de potencia es entregada a la antena, -7 dB es la potencia reflejada. El resto de potencia es aceptada o entregada por la antena. Esta potencia aceptada puede ser radiada o absorbida como pérdidas dentro de la antena. Dado que las antenas son típicamente diseñadas como elementos de baja pérdida, idealmente en el caso de recepción la mayoría de la potencia captada por la antena es recolectada. En términos de la potencia tenemos que la pérdida por retorno está dada por ecuación 1.

$$P_{ret} = 10 \log(P_{incidente}/P_{reflejada}) \quad (1)$$

- **Ancho de banda de antena:** En una antena su ancho de banda (conocido también como ancho de banda de impedancia) se refiere al rango de frecuencias donde cierto valor de pérdida por retorno puede mantenerse. Ya que la pérdida por retorno es una medida de cuánta potencia la antena acepta de la línea de transmisión, la impedancia de la antena debe acoplarse a la línea de transmisión para una máxima transferencia o captación de potencia. Sin embargo, la impedancia de la antena cambia con la frecuencia, lo que resulta en un rango limitado en el cual la antena puede acoplarse con la línea de transmisión. El ancho de banda de impedancia es una medida de este rango. Así, a partir de una frecuencia de diseño (f_0) el ancho de banda puede calcularse mediante ecuación 2.

$$BW = f_h - f_l \quad (2)$$

Diseño de la antena para la cosecha de energía

La antena considerada en este trabajo es la variación de una antena F-invertida (IFA), conocida como antena F-invertida impresa. Las antenas IFA son ampliamente conocidas (incluyendo su variante IFA impresa y la IFA planar) y utilizadas en dispositivos inalámbricos por mantener proporciones de tamaño pequeño, siendo un tipo de antenas que pueden ser impresas en tecnología de microcinta, lo que

tiene ventaja ya que permite ser manufacturada como parte del mismo circuito impreso usado para montar otros componentes, permitiendo además ser una solución económica por los métodos de producción en masa [Zhang, 2017].

Una antena IFA impresa puede implementarse en la forma clásica de una F-invertida, usualmente a un lado de la placa del circuito donde el plano de tierra se ha retirado por debajo de la antena. Es de aclarar que algunos autores llaman a la antena IFA impresa, también como PIFA (Printed Inverted-F Antenna), aunque otros reservan el acrónimo en inglés de PIFA (Planar Inverted-F Antenna), solo para aquellas antenas F-invertidas de parche en cortocircuito donde el elemento de antena es ancho con respecto al plano de tierra debajo de él. En este trabajo utilizaremos el término PIFA para referirnos a la antena F-invertida impresa.

La antena invertida-F impresa es a su vez una variante de un monopolo, donde la sección superior ha sido doblada, pero manteniéndose paralela al plano de tierra. Esto se realiza para reducir la altura de la antena mientras se mantiene una longitud de traza resonante. Esta sección paralela introduce capacitancia a la impedancia de entrada de la antena, la cual es compensada por un trozo de línea de transmisión en corto circuito, figura 4.

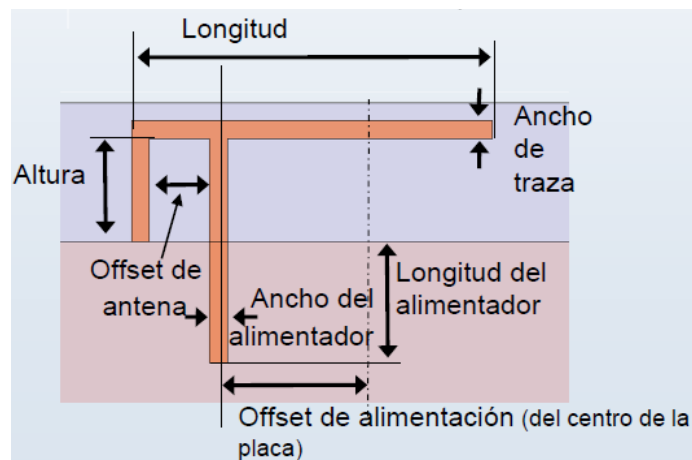


Figura 4 Antena PIFA con sus parámetros de diseño.

Las dimensiones de diseño para la implementación de la antena PIFA en este trabajo fueron obtenidas con ayuda del simulador electromagnético HFSS a través de su herramienta de diseño, las cuales se muestran en la figura 5.

Planar Inverted-F Antenna	
Units	cm
Solution Frequency (GHz)	2.4
Antenna Length1	2.46
Antenna Length2	0.79
Antenna Trace Width	0.15
Antenna Offset	0.44
Feed Offset	-0.49
Feed Length	0.015
Feed Width	0.15
Substrate Thickness	62mil
Substrate Dimension Along x	4.9
Substrate Dimension Along y	9.9

Figura 5 Parámetros de diseño obtenidos para la antena PIFA bajo estudio.

En este caso en específico (figura 5), para una frecuencia de operación de 2.4 GHz, la longitud total de la antena (Antenna Length1) se calculó de 2.46 cm, la altura de la antena (Antenna Length2) fue de 0.79 cm, el ancho de la traza (Antenna Trace Width) resultó de 0.15 cm.

La longitud y ancho del alimentador quedó en 0.015 cm y 0.15 cm, respectivamente. Se utilizó un sustrato RT/duroid 5880 para las simulaciones, el cual tiene una constante dieléctrica de 2.2, un factor de disipación o tangente de pérdidas de 0.0009 y con un grosor de 1.5 mm.

La dimensión del sustrato para el PCB es de 4.9 cm de ancho y 9.9 cm de largo, esta dimensión del PCB que es utilizado como plano de tierra es importante, si la dimensión cambia la respuesta de la antena cambiará; es decir, el impacto del plano de tierra en la antena PIFA es lo mismo como en el caso de una antena externa.

3. Resultados

Con el propósito de demostrar el enfoque de cosecha de energía en la frecuencia de 2.4 GHz, se diseñó y simuló una antena PIFA. Este tipo de antenas son típicamente utilizadas en teléfonos celulares inteligentes y otros dispositivos portables debido a su eficiencia y tamaño. Adicionalmente, las antenas PIFA son

usualmente diseñadas para múltiples bandas de frecuencia, en las que se incluyen el Wi-Fi, Bluetooth y las bandas celulares. En este trabajo el sistema de antena fue desarrollado y simulado utilizando el simulador electromagnético HFSS, el modelo obtenido es mostrado en la figura 6, donde claramente se puede observar la parte de la antena F invertida impresa a un lado de la placa del circuito donde el plano de tierra se ha retirado por debajo de la antena.

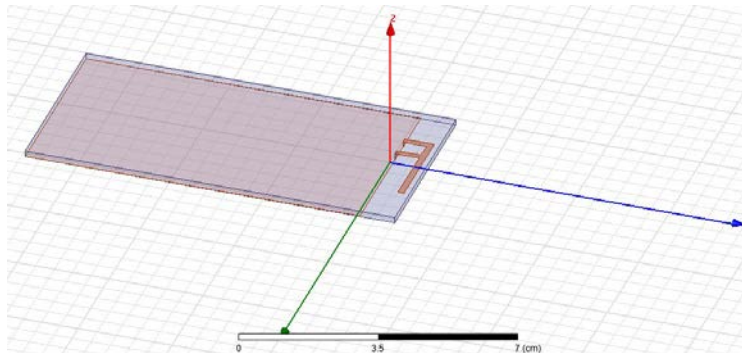


Figura 6 Modelo de antena PIFA.

Una vez obtenido el modelo se procedió a simular la antena en un barrido de frecuencia de 1.5 a los 3.5 GHz, incluyendo el rango de estudio de 2 GHz a 3 GHz. Este barrido en el rango de frecuencias mencionado, permitió obtener la figura 7 que muestra el parámetro S_{11} (pérdida por retorno) para una antena PIFA diseñada para operar dentro de una banda de frecuencia a 2.4 GHz, la cual se puede observar está satisfactoriamente resonando en su frecuencia de diseño.

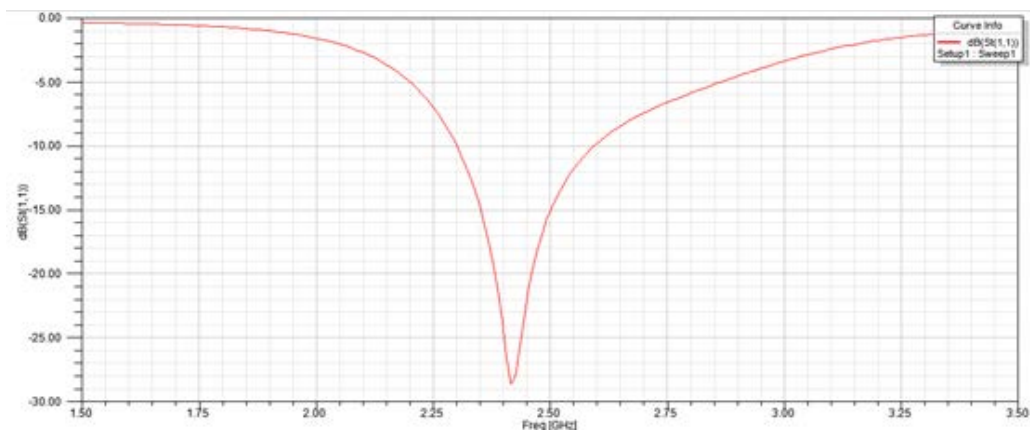


Figura 7 Pérdida por retorno (S_{11}) de la antena PIFA.

El ancho de banda de antena fue referenciado como el rango dentro del cual el conjunto de frecuencias para el cual el coeficiente de reflexión es -10 dB, asegurando que menos del 10% de la potencia es reflejada. El ancho de banda de impedancia a la referencia impuesta fue de aproximadamente 296 MHz, de 2.30 GHz hasta 2.59 GHz, como se muestra en la figura 8.

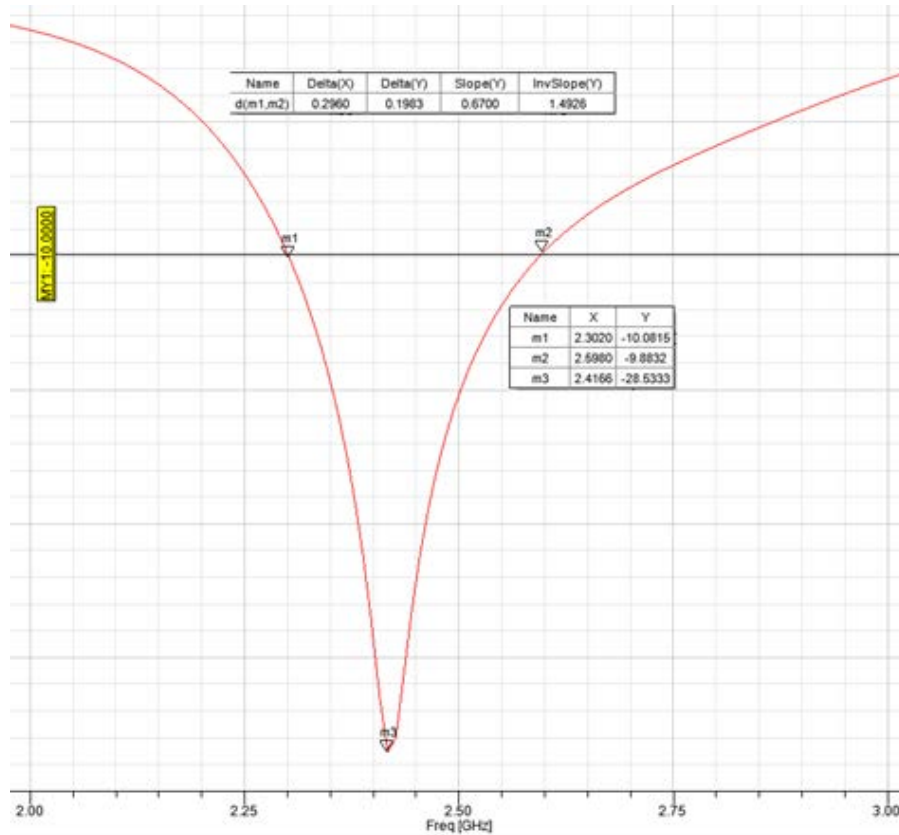


Figura 8 Ancho de banda de impedancia de la antena PIFA.

El análisis de las prestaciones de antena para un rango más amplio entre 2 y 3 GHz muestra que fuera del ancho de banda de operación la respuesta de la antena permite recolectar una potencia significativa fuera de la región de los -10 dB. En la figura 9, se muestra la cantidad proporcional de potencia que puede ser cosechada dentro del rango de 2 y 3 GHz asumiendo una densidad de potencia espectral constante (PSD, por sus siglas en inglés) a lo largo del rango de frecuencias. Las etiquetas de la figura 9, corresponden a una banda de frecuencia basadas en los puntos donde el coeficiente de reflexión cruza los puntos de -10 , -8 , -6 , -4 y los

-2 dB. Las letras indican estas sub-bandas dentro del rango de los 2-3 GHz: A (2.30 a 2.59 GHz); B (2.27 a 2.30 y 2.59 a 2.67 GHz); C (2.22 a 2.27 y 2.67 a 2.79 GHz); D (2.16 a 2.22 y 2.79 a 2.95 GHz) y E (2.04 a 2.16 y 2.95 a 3.17 GHz). Usualmente, la energía arriba de los -10 dB (i.e., 74% de la potencia disponible dentro del rango) es filtrada para mejorar las prestaciones del sistema de comunicación, energía que podría ser aprovechada para la cosecha de energía.

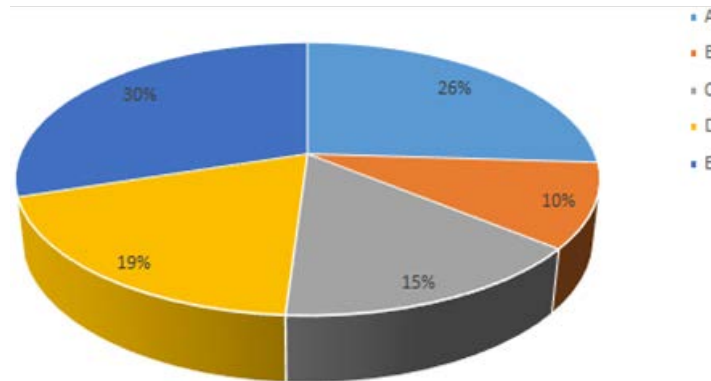


Figura 9 Energía disponible en banda y fuera de banda dentro del rango 2-3 GHz.

4. Discusión

Con base en lo mostrado en las secciones anteriores, muchos de los dispositivos inalámbricos actuales sintonizados a una frecuencia específica (por ejemplo, 2.4 GHz) no aprovechan las capacidades de recolección energía dentro de su banda de funcionamiento en períodos en los cuales no existe transmisión o recepción o a través de alguna de sus múltiples antenas. Más aún, existe un gran potencial de captación de energía de RF en bandas fuera de la frecuencia exacta de resonancia (incluso más energía que dentro de la banda de operación), ya que la antena en la mayoría de los dispositivos podría ser capaz de aprovechar un rango mucho mayor fuera de banda para cosechar energía, como se demuestra en los resultados de la sección anterior. Ya que dependiendo del diseño de la antena se podría fácilmente aprovechar rangos de frecuencia superiores e inferiores al rango de operación para esta tarea. A pesar de que el estudio se realizó a la frecuencia de operación de 2.4 GHz, se visualiza incluso en los resultados de las campañas de medición espectral (por ejemplo, figura 3), que se podría utilizar este mismo estudio en antenas

sintonizadas en otra frecuencia, para aprovechar la energía disponible en otras bandas de frecuencia.

Finalmente, es importante mencionar que los prototipos de dispositivos electrónicos sin batería que operan mediante cosecha de energía de RF cada vez presentan más aplicaciones. Por ejemplo, mediante una antena fractal para cosecha de RF en la banda de 1800 MHz en [Zeng, 2017] se demuestra que es capaz de alimentar un reloj digital de pantalla de cristal líquido a una distancia cercana de la estación base celular. También existen sistemas portátiles de medición y procesamiento de señales biológicas humanas como electrocardiograma o electroencefalograma que no usan batería y son alimentados mediante cosecha de energía en diferentes bandas de RF [Tran, 2017].

5. Conclusiones

En este trabajo fueron investigadas las oportunidades de cosecha de energía dentro y fuera de banda para un rango específico, utilizando un diseño y simulación de antena típicamente utilizada en dispositivos inalámbricos actuales. Adicionalmente, se realizó un análisis de la energía disponible dentro de la ciudad, dentro de un ancho de banda amplio utilizando los datos de una campaña de medición espectral, que nos proporcionó información de la energía dentro y fuera de banda disponible. Los resultados presentados muestran que, dentro del rango de estudio, las posibilidades de cosecha de energía fuera de banda, son superiores a la energía disponible dentro de la misma banda, lo cual nos invita a seguir con futuras investigaciones para recolectar esta energía actualmente no aprovechada.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Arista, D., Cárdenas, M., Pineda, U., Arce A. & Stevens, E. Spectrum Occupancy Measurements in the Sub-6 Ghz Band for Smart Spectrum Applications. 2018 IEEE Latin-American Conference on Communications (LatinCom), p. 1-5, Guadalajara, 2018.
- [2] Balanis, C.A. Antenna Theory. Analysis and Design. John Wiley & Sons, Inc., 2a. edición, 1997.

- [3] Instituto Federal de Telecomunicaciones, Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF), <http://cnaf.ift.org.mx>. 2019.
- [4] Kim, S., Vyas, R., Bito, J., Niotaki, K., Collado, A., Georgiadis, A. & Tentzeris, M. Ambient RF Energy-Harvesting Technologies for Self-Sustainable Standalone Wireless Sensors Platforms. *Proceedings of the IEEE*, Vol 102, No. 11, p. 1649-1666, 2014.
- [5] López, M. & Casadevall, F. Spectrum usage in cognitive radio networks: From field measurements to empirical methods. *IEICE Transactions on Communications*, Vol. 97, No. 2, p. 242-250, 2014.
- [6] Rocke, S. Out-of-Band radiation: Opportunities for antenna-based RF energy harvesting in wireless devices?. 2015 IEEE Online Conference on Green Communications (OnlineGreenComm), p. 53-58, On-line, 2015.
- [7] Srinivasu, G., Sharma, V., Anvesh Kumar, N. A Survey on Conceptualization of RF Energy Harvesting. *JASC: Journal of Applied Science and Computations*, Vol. VI, Issue: II, p. 791-800, 2019.
- [8] Tran, L., Cha, H., Park, W. RF Power Harvesting: a review on designing methodologies and applications. *Micro and Nano Systems Letters*, 5:14, 2017.
- [9] Vandelle, E., Ngan Bui, D., Voung, T., Ardila, G., Wu, K., Hermour, S. Harvesting Ambient RF Energy Efficiently with Optimal Angular Coverage. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 67, No. 3, p. 1862-1873, 2019.
- [10] Zeng, M., Andrenko, A., Liu, X., Li, Z., Tan, H. A Compact Fractal Loop Rectenna for RF Energy Harvesting. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 16, p. 2424-2427, 2017.
- [11] Zhang, Z. *Antenna design for mobile devices*. John Wiley & Sons, 2a. edición,, 2017.
- [12] Zhao, Y., Leung, V., Zhu, C., Gao, H., Chen, Z., Ji, H. Energy-Efficient Sub-Carrier and Power Allocation in Cloud-Based Cellular Network with Ambient RF Energy Harvesting. *IEEE Access*, Vol. 5, p. 1340-1352, 2017.