

Etapas óptimas de sistemas de captación y almacenamiento de energía de RF

(Optimal stages of RF energy harvesting and storage systems)

Cuji Julio¹, Merino Danny², Brito Giovanni³, Gordón Carlos⁴

Resumen

Este documento revisa los modelos de sistemas de captación de energía de Radiofrecuencia (RF) a partir de la información recogida en varios artículos publicados en repositorios científicos de todo el mundo. Tiene como objetivo registrar información relevante de cada uno de ellos, como: topología del sistema, circuitos y características de cada etapa, componentes electrónicos utilizados, dimensiones, entre otros, para tabular y cotejar estos datos, con el fin de determinar cuál es el que presenta mejores características por etapa y así considerarlo para realizar una investigación profunda y mejorar su diseño para captar energía. En este estudio se utilizó una metodología dividida en cuatro fases: investigación, lectura científica, extracción de información relevante y tabulación. Una vez realizado el estudio de los sistemas seleccionados, se compararon los resultados obtenidos en cada uno y se seleccionó la topología, circuitos o elementos que obtuvieron mejores resultados para las etapas: Antena, Acoplamiento, Rectificación, Administración de energía y Almacenamiento de energía. Finalmente, se creó una aplicación para dispositivos Android en la que se encuentra toda la información recolectada y los resultados obtenidos de manera que funcione como una fuente de consulta para futuras investigaciones.

Palabras clave

Recolección de energía; Radiofrecuencia; Multiplicadores de voltaje; Rectena; Etapas.

Abstract

This document presents a review of models of Radiofrequency (RF) energy harvesting systems, extracted from articles published in scientific repositories around the world. Its objective is to extract relevant information from each of them, such as: system topology, circuits and characteristics of each stage, electronic components used, dimensions, among others. With this information, the data is tabulated and compared, in order to determine which one has the best characteristics according to each stage and consider it to carry out a deeper investigation and improve its design to capture more energy. To carry out this study, a methodology divided into four phases was used, which are: research, scientific reading, extraction of relevant information and tabulation. Once the study of the selected systems was carried out, a comparison was made between the results obtained in each one and the topology, circuits or elements that obtained the best results for the stages of: Antenna, Coupling, Rectification, Energy Management and Storage were selected. of energy. Finally, an application for Android devices was created in which all the information collected, and results obtained are found so that it works as a reference source for future research.

Keywords

Energy Harvesting; Radiofrequency; Voltage Multipliers; Rectenna; Stages.

1. Introducción

El uso de dispositivos inalámbricos se ha incrementado paulatinamente desde su creación, porque resultan más prácticos en comparación con los cableados, debido a su versatilidad y facilidad de transporte al no contar con un cable que los sujete todo el tiempo a una toma de

1 Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador [julioecuji@uta.edu.ec], <https://orcid.org/0000-0002-0843-735X>.

2 Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador [dmerino2235@uta.edu.ec], <https://orcid.org/0000-0003-3797-1006>.

3 Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador [geovannidbrito@uta.edu.ec], <https://orcid.org/0000-0002-0320-9227>.

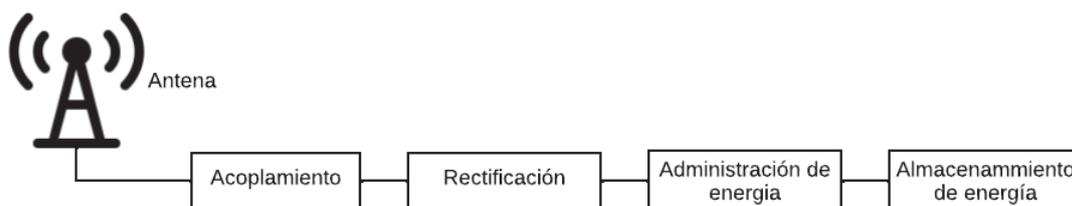
4 Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador [cd.gordon@uta.edu.ec], <https://orcid.org/0000-0002-8031-2658>.

corriente, además de que es la ruta esencial para la interconexión de objetos inteligentes (Cama A, De La Hoz y Cama D, 2012). Estos dispositivos tienen como fuente de energía principal una o más baterías, que se encargan de suministrar la energía eléctrica necesaria para que realicen sus operaciones (Tobar, 2021). Sin embargo, la esperanza de vida útil de una batería es limitada y puede reducirse según su tiempo de uso, mantenimiento inadecuado, sobrecarga o escasez de carga, entre otras (Rajshekhar et al., 2019). Por tanto, es necesario encontrar una fuente de energía permanente y más confiable (Awais et al., 2019). La vida útil de una batería se expresa como el número de ciclos de carga/descarga que puede soportar. Las baterías de Litio pueden soportar de 500 a 7000 ciclos, según su tecnología y el uso que se les dé, por lo que no son sistemas sostenibles a medio y largo plazo (Cansiz, Altinel y Kurt, 2019) (Núñez, 2018).

Con el fin de dar solución a este problema, ha surgido una tecnología conocida como recolección de energía o captación de energía, que consiste en capturar y convertir las ondas electromagnéticas existentes en el ambiente en energía eléctrica DC (Takhedmit et al., 2014). Existen diversas fuentes de energía en el ambiente: hidráulica, térmica, solar, eólica, radiofrecuencia, sonido, movimiento, vibración etc. (Tony y Hiryanto, 2019) (Garg N. y Garg R., 2017). Estas fuentes se han utilizado por muchos años a gran escala para generar energía eléctrica, como en centrales hidroeléctricas o centrales eólicas (Elahi et al., 2020). Para aplicaciones de baja potencia, la tecnología de recolección y almacenamiento de energía de radiofrecuencia ha crecido drásticamente (Lu et al., 2015), gracias a que este tipo de señales prevalecen en el ambiente, como señales de TV, radio, telefonía celular, satelital Wifi, entre otras (Kim et al., 2014).

El objetivo de este trabajo es responder a la pregunta: ¿Cuáles son las topologías, de circuitos que presentan mejores características para cada etapa de un sistema de captación de energía de RF?, mediante el análisis de resultados de sistemas propuestos en diferentes artículos científicos. Para determinar un modelo de sistema óptimo con el que se pueda obtener mejores resultados. En la figura 1. se muestra el esquema de un sistema de captación y almacenamiento de energía de RF conformado generalmente por las siguientes etapas: antena; acoplamiento; rectificación de voltaje; administración de energía y almacenamiento de energía. (Adnan et al., 2019) (Ali, Albasha y Qaddoumi, 2013) (Dolgov, Zane y Popovic, 2010).

Figura 1. Etapas de un sistema de captación y almacenamiento de energía



Estos sistemas se pueden dividir en dos categorías. La primera es para captación de RF ambiental pasiva en la que se aprovechan las señales existentes en el ambiente como las de TV, FM, AM, WiFi, etc. La segunda es para la captación de señales RF de una fuente específica controlada (Moghaddam et al., 2017). Las señales de radiofrecuencia son capturadas por la antena que es un elemento encargado de transformar ondas electromagnéticas en energía eléctrica (Ong, Karim y Nasimuddin, 2014). El circuito de acoplamiento de impedancias es utilizado para asegurar la máxima transferencia de potencia posible entre las etapas de antena y rectificador (Mindan y Hong, 2010). El rectificador es el encargado de transformar la corriente alterna AC en

corriente directa DC (Arrawatia, Baghini y Kumar, 2016). El multiplicador de voltaje es necesario debido a que el voltaje entregado por el rectificador normalmente es muy pequeño, por lo que se utiliza para incrementar el nivel de voltaje DC (Sari y Uzun, 2019). Toda esta energía captada se puede reservar en un dispositivo de almacenamiento de energía o puede ser entregada directamente a el dispositivo de aplicación (Kaur, Sharma y Kumar 2018), la etapa encargada de realizar esta gestión es la de administración de energía (Zeng et al., 2020). Para la etapa de almacenamiento de energía los dispositivos más utilizados son baterías recargables sin embargo el uso de supercondensadores se viene estudiando, debido a que cuentan con mejores características como, ciclos de carga/descarga y eficiencias mayores (Kim y Chou, 2015). La etapa final de un sistema de captación de energía es la de aplicación o dispositivo que se conecta al sistema para alimentarlo con la energía captada (Cansiz et al., 2019).

El presente trabajo de investigación ha permitido desarrollar una aplicación para dispositivos Android, la cual provee toda la información y resultados obtenidos. La utilidad de la aplicación desarrollada es que contiene el estado del arte acerca de las etapas óptimas de sistemas de captación y almacenamiento de energía de RF, que se irá actualizando de manera periódica mensual. Esta aplicación será muy útil para los investigadores expertos en el área, ya que proporciona información científica de manera didáctica, organizada, sintetizada y actualizada, lo que facilita el acceso y la optimización de diversos recursos como el tiempo y los recursos económicos, ya que los investigadores tendrán acceso inmediato a la información científica actualizada. Un valor agregado de la aplicación para dispositivos Android es la motivación a la investigación, porque contribuye con una herramienta de fácil acceso y manejo para los profesionales que están comenzando sus actividades investigativas en esta área. Ya que tendrán en sus manos una herramienta que provee información científica que facilitará la asimilación de los conceptos de una manera didáctica y rápida, motivándoles a dichos profesionales a continuar sus estudios en el área.

2. Metodología

Se realiza una investigación exhaustiva acerca de sistemas de captación de energía para radiofrecuencia, en repositorios institucionales y revistas indexadas. Para ello, se tomaron en cuenta trabajos en los cuales se describa el diseño, la topología y características de los circuitos empleados para las etapas fundamentales de un sistema de captación de energía y que detallen claramente los resultados medidos y simulados de su trabajo. De los documentos encontrados se han identificado 15 sistemas de captación de energía y 5 sistemas multiplicadores de voltaje que cumplen con las características de selección, además de presentar mejores resultados con respecto a trabajos similares. Estos sistemas son:

- S1: Sistema de recolección de energía (Energy Harvesting), que emplea la corriente Corona y señales de alta frecuencia.
- S2: Sistema de Cosechamiento de Energía con Radio Frecuencia.
- S3: "Microstrip Antenna Designs for RF Energy Harvesting".
- S4: "Radio Frequency Energy Harvesting System Making Use of 180° Hybrid Couplers and Multiple Antennas to Improve the DC Output Voltage".
- S5: "Design of a High-Efficiency 2.45-GHz Rectenna for Low-Input-Power Energy Harvesting".
- S6: "A Dual-Frequency Ultralow-Power Efficient 0.5-g Rectenna".

- S7: "A Dual-Band Rectenna Using Broadband Yagi Antenna Array for Ambient RF Power Harvesting".
- S8: "A High-Efficiency Broadband Rectenna for Ambient Wireless Energy Harvesting".
- S9: "Wireless Power Harvesting with Planar Rectennas for 2.45 GHz RFIDs".
- S10: "A Compact Dual-Band Rectenna Using Slot-Loaded Dual Band Folded Dipole Antenna".
- S11: "A Compact Fractal Loop Rectenna for RF Energy Harvesting".
- S12: "Energy harvesting and management from ambient rf radiation".
- S13: "A Compact Slot Loop Rectenna for Dual-Band Operation at 2.4- and 5.8-GHz Bands".
- S14: Conditioning System for An Electromagnetic Energy Collection Device.
- S15: RF Energy Harvesting using Efficient Power Management System
- S16: "Efficiency enhanced voltage multiplier circuit for RF energy harvesting".
- S17: "A 13.56 MHz Low-Voltage and Low-Control-Loss RF-DC Rectifier Utilizing Reducing Reverse Loss Technique".
- S18: "Efficient ultra low power rectification at 13.56 MHz for a 10 μ A load current".
- S19: "Analysis and Design of Cmos Full-Wave Rectifying Charge Pump for RF Energy Harvesting Applications".
- S20: "Design of 900 MHz AC to DC Converter Using Native CMOS Device of TSMC 0.18 Micron Technology for RF Energy Harvest Application".

Se analizó cada sistema y los datos obtenidos para cada uno son:

S1: Este sistema está conformado por las etapas: antena, acoplamiento, rectificación, administración de energía y almacenamiento de energía. Utiliza una antena tipo ETC (Electrodo tipo corona), con ganancia de 5.36 dBi, a una frecuencia de trabajo de 0.110 GHz. Para la red de acoplamiento antena-rectificador utiliza un conector con convertidor de BNC ("Bayonet Neill-Concelman") a SMA ("SubMiniature version A"). Para la rectificación, en modo de recolección de corriente corona se utiliza un puente rectificador con diodos 1N4148 y un zener de 3.9V para regular el voltaje. Para el almacenamiento se utiliza una batería de litio con un voltaje nominal de 3.7 V (Guerrero, 2016).

S2: La antena propuesta es de tipo monopolo espiral con tecnología *microstrip* la cual trabaja a 915 MHz. Para el acoplamiento utiliza un acoplador del modo "single stub". En la rectificación se utiliza un circuito doblador de voltaje tipo Villard de cuatro etapas con el integrado HSMS-285C. La energía recolectada es aplicada directamente utilizando una resistencia de carga de 85 K Ω como etapa de aplicación (Torrealba et al., 2016).

S3: El autor presenta una "Square Microstrip patch antena", diseñada para una frecuencia única de 2.4 GHz. Las simulaciones realizadas en el *software* HFSS, muestran que, para una frecuencia de 2.43 GHz, la pérdida por retorno es de 9.815dB, un VSWR (relación de onda estacionaria de voltaje) de 1.9543, una impedancia de 50.1468 ohmios y una ganancia de 7.69dB. Para el acoplamiento utiliza un circuito en L con dos inductores en serie. Para la rectificación se utiliza un circuito doblador de dos etapas conformado por diodos Schottky y condensadores electrolíticos (Ramesh y Rajan, 2014).

S4: Este sistema utiliza antenas multibanda con tecnología *microstrip* para formar un arreglo de hasta 4 antenas. Para ello, se implementó una etapa de combinadores de energía RF, compuesto por tres circuitos acopladores híbridos de 180° configurados en modo de suma. Se cuenta con una red de acoplamiento de impedancias tipo *stub* por cada banda de operación.

Para la rectificación utiliza un circuito doblador de voltaje con diodos Schottky SMS7630-079LF (Martinez et al., 2020).

S5: El artículo presenta una antena tipo CPS-microstrip, que trabaja a una frecuencia de 2.45 GHz con ganancia de 8.6 dBi y dimensiones de 90x87x0.635 mm. El autor explica que se realizó este diseño por su estructura simple y con el fin de lograr ganancias altas. Para el acoplamiento diseña un acoplador de doble *stub*, con el cual se conecta a un rectificador de media onda con diodos Schottky HSMS-2852 (Sun et al, 2012).

S6: El autor propone un arreglo de antenas tipo Yagi-Uda con tecnología *microstrip*, a una frecuencia de trabajo de 915 MHz y 2.45 GHz. Con la simulación se obtuvo ganancias de -3.03 dBi para la frecuencia de 915 MHz y 7.59 dBi para 2.45 GHz. Se utiliza un acoplamiento directo entre la antena y el rectificador. La etapa de rectificación está formada por un circuito rectificador no lineal con diodos Schottky. La resistencia de carga utilizada es de 2.2 K Ω (Scheeler, Korhummel y Popovic, 2014).

S7: El artículo presenta un arreglo de 4 antenas Cuasi-Yagi con tecnología *microstrip*, diseñadas para trabajar a un ancho de banda de 1.8 a 2.2 GHz y ganancias altas de 10.9 y 13.3 dBi, respectivamente. El circuito de acoplamiento es de doble frecuencia optimizado por separado para que coincida con la impedancia de entrada del rectificador a 50 ohms. Para la rectificación se adopta una topología de diodos en serie, un diodo Schottky HSHS-2852 entre el circuito de acoplamiento y el filtro pasa banda (Sun et al, 2013).

S8: Los autores realizan el diseño de una antena plana de doble polarización para la banda de frecuencias de 1.8 a 2.5 GHz, con ganancias de 2.5 y 4.12 dBi, respectivamente y unas dimensiones de 70x70x13.2 mm. El circuito de acoplamiento diseñado es de dos ramas. El rectificador utilizado es de onda completa llamado Greinacher, equivalente a un multiplicador de voltaje de dos etapas, los diodos utilizados son tipo Schottky SMS7630. La resistencia de carga óptima se calculó en 14.7 K Ω (Song et al, 2015).

S9: La antena propuesta es un diseño de antena tipo *patch microstrip* para la frecuencia de 2.45 GHz. Con las simulaciones realizadas se obtuvo una ganancia de 4 dBi. Para la rectificación el autor diseñó un multiplicador de voltaje Dickson de dos etapas con diodos Schottky. La resistencia de carga utilizada es de 13 K Ω . Se evaluó la efectividad del sistema utilizando un diodo emisor de luz (LED) de 1.5 V (Olgun, Chen y Volakis, 2010).

S10: Este sistema está compuesto por una antena tipo "Slot-Loaded Dual Band Folded Dipole" que opera a frecuencias de 915 MHz y 2.45 GHz, lograron ganancias de 1.87 dBi y 4.18 dBi, respectivamente, con dimensiones de 60x60x60 mm. La etapa de acoplamiento está conformada por tres inductancias y un *stub* radial. Para la rectificación se utiliza un diodo Schottky SMS7630 después de la etapa de acoplamiento y un condensador para eliminar el rizado. Se utiliza una resistencia de carga de 2.2 K Ω . Las mediciones con este sistema se realizaron para una densidad de 1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ y muestran eficiencias de conversión de RF a DC de 37 % y 20 % para las frecuencias 915 MHz y 2.45GHz respectivamente con una potencia de entrada de 0 dBm (Niotaki et al., 2013).

S11: Se presenta el diseño de una antena tipo bucle fractal (M. Zeng A. S.-Z., 2016), para la frecuencia de 1.8 GHz con una ganancia medida de 3 dBi, con mediciones reducidas. Para el acoplamiento de impedancias el autor propone un ILGP ("in-loop ground plane"), permitiendo un buen acoplamiento a 50 Ω . El rectificador de este sistema se encuentra integrado dentro del bucle, basado en el rectificador de onda completa de Greinacher. Las mediciones se realizaron

a 10 m de una estación base celular y se agregó un condensador de 330 μF para almacenar la energía recolectada (Zeng et al, 2017).

S12: En este artículo se propone una antena de parche *microstrip* rectangular que trabaja en el rango de la banda de GSM 900. El autor describe el uso de un circuito de acoplamiento de impedancias, sin embargo, no se especifica el tipo o sus características. Para la rectificación se utiliza un multiplicador de voltaje tipo Dickson de 3 etapas con diodos Schottky HSMS-2850. El circuito integrado utilizado es el LM2577 que permite regular o incrementar el voltaje de entrada del circuito. Se utiliza un "Thin capacitor" de 470 μF para almacenar la energía recolectada y entregarla a la batería. Finalmente cuenta con un relé de 5 pines para cambiar el voltaje de la batería a la carga. (Nalini et al., 2017).

S13: Este sistema presenta una antena de ranura de bucle cuadrada. De doble banda para frecuencias de 2.4 GHz y 5.8 GHz. La etapa de acoplamiento de impedancias está formada por una derivación conectando un circuito de acoplamiento tipo T pasa bajos y pasa altos. El circuito rectificador se compone de dos ramas paralelas formadas cada una por un diodo y un condensador conectados en serie y una resistencia de carga de 5.1 $\text{K}\Omega$ conectada entre la unión de los dos ramales (Huang y Chen, 2016).

S14: Este artículo presenta una etapa de acoplamiento mediante un *stub* simple entre una antena tipo Log-periódica a 2.4 GHz y un multiplicador tipo Dickson de 4 etapas con diodos Schottky HSMS286C, las mediciones realizadas muestran que con la etapa de acoplamiento el voltaje de salida del sistema se incrementa gracias a que toda la energía que capta la antena se transfiere hacia el multiplicador casi sin pérdidas, para la etapa de almacenamiento de energía se utiliza una pila NiMA de 1.2V (Balarezo et al., 2022).

S15: Se presenta el diseño de un multiplicador de voltaje de onda completa con transistores PMOS y elaborado con tecnología Metal-óxido-semiconductor complementario (CMOS) de 7 etapas. Las simulaciones de este sistema se realizaron con una corriente de carga de 10 μA . Los resultados muestran que para una señal de RF única de 900 MHz y un voltaje de entrada de 390 mV (Mane et al., 2020).

S16: Este sistema cuenta con una topología tipo diferencial de dos etapas fabricado con tecnología de 0.18 μm CMOS. La frecuencia de trabajo es 433 MHz. Las mediciones se realizaron con resistencias de carga de diferentes valores y con una potencia de entrada en el rango de 0 dBm a 20 dBm. Los resultados demostraron que este sistema presenta una eficiencia de conversión de potencia del 74 % para una potencia de entrada de 2 dBm y con una resistencia de carga de 5 $\text{K}\Omega$ (Chouhan, Nurmi y Halonen, 2016).

S17: El autor presenta un rectificador de 3 etapas diseñado con técnicas de RRL (reducción de pérdida inversa), lo que permitiría una alta eficiencia de conversión de potencia. El tipo de rectificador se lo denomina "Comparator-based / Active-diode". La frecuencia de trabajo es 13.56 MHz. Este circuito presentó una eficiencia de conversión de potencia del 67.9 % para una potencia de entrada de 12.8 dBm (Hwang et al, 2014).

S18: El multiplicador de voltaje presentado es un rectificador tipo Greinacher de 3 etapas, con frecuencia de trabajo de 13.56 MHz y fabricado con tecnología CMOS. Para realizar las mediciones se utilizó un generador de ondas, para una corriente de carga de 10 μA , obteniendo que para 1 Vpp como voltaje de entrada se alcanza 1.985 V DC a su salida, con una eficiencia de conversión de potencia del 72 % (Haddad et al., 2014).

S19: Se presenta el diseño de un multiplicador de voltaje de onda completa con transistores PMOS y elaborado con tecnología CMOS de 7 etapas. Las simulaciones de este sistema

se realizaron con una corriente de carga de 10 μ A. los resultados muestran que para una señal de RF única de 900 MHz y un voltaje de entrada de 390 mV. El voltaje en la salida incrementa a 1 V, por lo que la eficiencia de conversión de potencia es del 44 % (Wang, Chen y Wong, 2015).

S20: Se presenta un multiplicador de voltaje de media onda de 4 etapas que utiliza dispositivos nativos con tecnología TSMC CMOS de 0.18 μ m. Este sistema trabaja a 900 MHz. Para las mediciones se utiliza una resistencia de carga de 100 K Ω y un voltaje de entrada de 390 mV. En la salida del circuito se mide un voltaje DC de 2.1 V. la eficiencia del multiplicador es del 37.42 %. (Rodríguez, Cruz y Ramos, 2015).

En la tabla 1 se presenta un resumen comparativo de los parámetros relevantes para la investigación como tipo de antena, acoplamiento, rectificación, voltaje recolectado y eficiencia que presentan cada uno de los sistemas estudiados.

Tabla 1. Tecnologías utilizadas para cada etapa del sistema y sus resultados

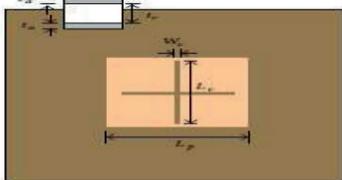
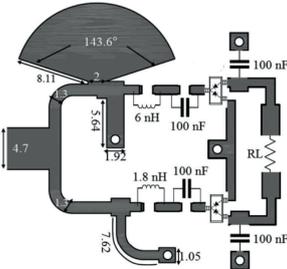
Sistema	Tipo de antena	Acoplamiento	Rectificación	Voltaje recolectado (V)	Eficiencia medida
S1	Electrodo tipo corona (ETC)	Conector con transición de BNC a SMA.	Puente de diodos y condensador	7.8	35 %
S2	Monopolo espiral	Stub simple	Doblador de voltaje tipo Villard de 4 etapas	0.00569	40 %
S3	Parche cuadrado	Circuito en L con dos inductores en serie	Doblador de dos etapas con diodos Schottky	-	-
S4	Antenas multibanda	Stub por cada banda de operación	Doblador de voltaje con diodos schottky	0.903	68 %
S5	CPS- <i>microstrip</i>	Acoplador de doble stub	Diodo Schottky, un filtro de paso de CC.	1	70 %
S6	Arreglo yagi-uda	Acoplamiento directo de impedancias	Rectificador no lineal con diodo schottky		56.20 %
S7	Cuasi-yagui	Acoplamiento de doble frecuencia	Diodos en serie, filtro de paso de CC	0.4	50 %
S8	Plana de doble polarización	Acoplamiento de dos ramas, stub radial, stub corto e inductancias	Rectificador de onda completa Greinachar	0.3	70 %
S9	Parche fractal	-	Multiplicador de voltaje Dickson de dos etapas	1.6	70 %
S10	Dipolo plegado de doble banda con ranura	Acoplamiento con tres inductancias y un stub radial	Diodo schottky y un condensador	-	48 %
S11	Bucle fractal	Plano tierra en bucle (ILGP)	Divisor de potencia y dos ramas integrado dentro del bucle	1.8	61 %
S12	Parche rectangular	-	Multiplicador de voltaje tipo Dickson de 3 etapas con diodos Schottky	2	-
S13	Ranura de bucle cuadrado	Derivación circuito de acoplamiento tipo T pasa bajos y pasa altos	Dos ramas paralelas formadas por un diodo y un condensador	-	49.66 %

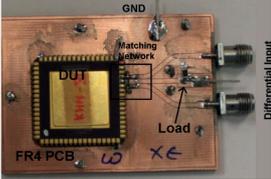
S14	Log-periódica	Stub simple	Multiplicador Dickson de 4 etapas	0.372	-
S15	-	-	Multiplicador de onda completa con transistores PMOS	1	44 %
S16	-	-	Diferencial de dos etapas con tecnología CMOS	0.8	74 %
S17	-	-	Rectificador de 3 etapas Comparator-based/ active-diode	1.2	67.90 %
S18	-	-	Greinacher de 3 etapas CMOS	1.985	72 %
S19	-	-	Rectificador de onda completa con transistores PMOS	0.61	44 %
S20	-	-	Multiplicador de voltaje de media onda de 4 etapas	1.71	37 %

3. Resultados y discusión

Una vez analizados los artículos seleccionados, se compararon los diferentes sistemas, topologías, circuitos y elementos que se utilizaron para las etapas de: antena, acoplamiento, rectificación, administración de energía y almacenamiento de energía en cada uno de los sistemas, así como los resultados obtenidos, con el fin de seleccionar los que presenten las mejores características en cada etapa, como se visualiza en la tabla 2.

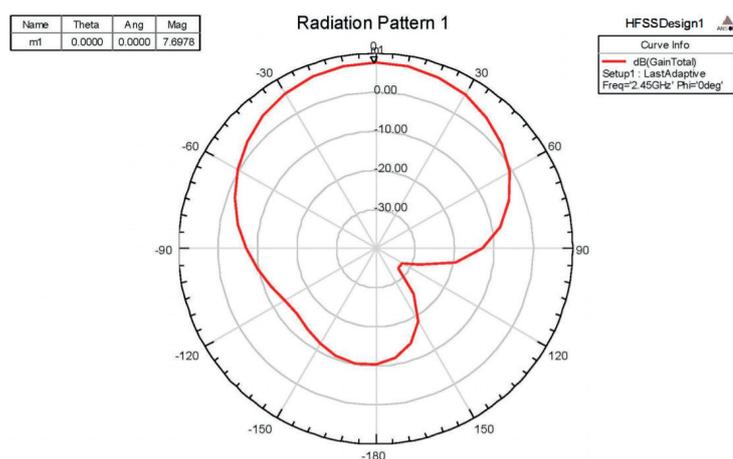
Tabla 2. Resultados más eficientes para cada etapa de un sistema de recolección de energía.

Etapa	Tecnología	Imagen	Eficiencia	Referencia
Antena	Microstrip patch antenna a 2.4 GHz		Ganancia de 7.69 dBi	(Ramesh y Rajan, 2014)
Acoplamiento	Acoplamiento de dos ramas		70 %	(Song et al., 2015)

Rectificación	Multiplicador de 2 etapas con tecnología CMOS		74 %	(Chouhan et al., 2016)
Administración de energía	C.I BQ25504		-	(Zhang, Wang y Qian, 2020)
Almacenamiento	Supercondensadores		90 %	(Pérez, 2016)

Al tener en cuenta los resultados de las antenas estudiadas en los diferentes artículos, se puede deducir que la antena con mayor ganancia es la de tipo Quasi-yagui para 1.8 y 2.2 GHz, no obstante, es la antena que cuenta con las mayores dimensiones de todas. Por otro lado, la antena tipo "CPS-microstrip" para una frecuencia de 2.45 GHz con una ganancia elevada de 8.6 dBi tiene dimensiones un tanto más reducidas, sin embargo, es aún demasiado grande como para ser considerada óptima, según los parámetros considerados. Finalmente se podría considerar como un modelo de antena óptimo, a la antena tipo "Microstrip patch antenna", para frecuencias de 2.43 GHz presentada en (Ramesh y Rajan, 2014). La cual posee una ganancia de 7.69 dBi y de dimensiones muy reducidas, que la hace idónea para este tipo de aplicaciones. El patrón de radiación de esta antena se presenta en la figura. 2.

Figura 2. Patrón de radiación de la antena tipo "Microstrip patch" (Ramesh y Rajan, 2014)



La etapa de acoplamiento de impedancias se encarga de incrementar lo máximo posible, la transferencia de potencia entre las etapas de antena y rectificación, esto se logra al igualar las impedancias de estas dos etapas mediante componentes resistivos inductivos y capacitivos o mediante acoplamiento con uno o más *stubs* (Shinki et al., 2017). De las metodologías de acoplamiento utilizadas en los sistemas estudiados, la que sobresale es la presentada en

"A High-Efficiency Broadband Rectenna for Ambient Wireless Energy Harvesting" (Song et al., 2015), de un circuito de acoplamiento de impedancias de dos ramas. La rama superior está compuesta por un *stub* radial, un *stub* corto y un chip inductor de 6-nH, para acoplar el circuito alrededor de 1.8 y 2.5 GHz. La rama inferior está formada por un *stub* corto en codo y un chip inductor de 1.8-nH, para acoplar el circuito a 2.1 GHz. Este tipo de acoplamiento dio como resultado una máxima eficiencia de conversión de 70 % y de dimensiones reducidas.

Para la etapa de rectificación según Scorcioni, Larcher y Bertacchini (2012) entre las diversas soluciones de circuito propuestas para los rectificadores de voltaje, la mejor opción en Radiofrecuencias es el multiplicador de voltaje clásico de Dickson. Esta topología de multiplicador de voltaje es la más adecuada para trabajar con RF, debido a que no son necesarios diodos o componentes inductores y el voltaje de salida depende de la amplitud del voltaje de entrada, la calidad de voltaje a través del transistor y el número de etapas de multiplicación. Considerando transistores idénticos y capacitancias suficientemente altas como para que su impedancia sea despreciable, con este principio Chouhan, Nurmi y Halonen (2015) presentan un multiplicador de dos etapas utilizando tecnología estándar CMOS 0.18 μm , este sistema se considera el más óptimo entre los estudiados debido a su eficiencia medida que alcanza el 74 % con una potencia de entrada de -2 dBm (Scorcioni et al., 2012) (Chouhan et al., 2015).

La unidad de administración de energía es una parte integral en sistemas de recolección de energía, ya que se encarga de controlar el almacenamiento de la energía recolectada por el sistema, además gestiona la distribución de energía disponible para la etapa de aplicación con el fin de incrementar la vida útil del dispositivo, manteniendo la calidad de servicio QoS (Piñuela, 2013). Usualmente son circuitos integrados que contienen en su interior funciones que permiten la gestión de la energía que ingresa para transferirla de manera eficiente (Martinho, 2020).

Para la etapa de administración de energía en el artículo Piñuela (2013) y Eid et al. (2017), se utiliza el circuito integrado BQ25504 que es un circuito integrado convertidor elevador de potencia ultra baja con gestión de batería, fabricado por Texas Instruments Inc, cuenta con características de bajo consumo de corriente y bajo voltaje de entrada que varía entre 80 mV y 330 mV (Zhang et al., 2020), lo que lo hace ideal para este tipo de sistemas, que incluye un elevador que aumenta su voltaje de entrada a niveles útiles de entre 2.4 V y 5.3 V; además cuenta con un modelo de gestión de batería que se utiliza para controlar el ciclo de trabajo de la potencia de salida a la carga.

Los circuitos de recolección de energía están diseñados para producir una cierta cantidad de potencia. Si la potencia media cosechada es mayor que el consumo de energía de la carga, el circuito de recolección puede alimentar la carga continuamente (Jabbar, Song y Jeong, 2010). Por lo tanto, no se requiere ningún dispositivo de almacenamiento de energía. De lo contrario, si la potencia media cosechada es menor que el consumo de energía de la carga, dicha energía debe acumularse en un dispositivo de almacenamiento de energía, hasta que sea capaz de alimentar a la carga (Cansiz et al., 2019).

Para el almacenamiento de energía, se tiene como una alternativa las baterías convencionales que pueden ser de diferentes tipos como: níquel cadmio (NiCd), plomo ácido sellado (SLA), hidruro metálico de níquel (Ni-MH) (Gudan et al, 2014), entre otras. Para la elección del tipo de batería a utilizar se puede considerar los siguientes parámetros:

- Eficiencia de conversión de energía versus bajo nivel de potencia de entrada.
- Conversión de energía eficiencia versus alto nivel de potencia de entrada.
- Eficiencia de conversión de energía versus rango ampliado de potencia de entrada.

Otra opción para esta etapa es el uso de supercondensadores que son una variación del condensador electrolítico común, con la diferencia de que posee una considerable capacidad de almacenamiento energético (Pérez, 2016). Entre las ventajas con las que cuentan los supercondensadores están su mayor entrega de potencia, períodos de carga más cortos, ciclos de carga de miles o millones, soportan valores de corriente altos, alta eficiencia, gran rango de tensión, sin mantenimiento, menor tamaño, buen desempeño en temperaturas extremas. Algunas de sus desventajas son, densidad energética limitada (Sharma y Bhatti, 2010), no puede utilizar el espectro de energía completo, células con bajas tensiones, alta autodescarga, precio elevado y que es un poco más complejo (Berrueta et al., 2019).

La etapa de aplicación o carga se refiere al dispositivo el cual se desea alimentar con el sistema de captación de energía. Puede ser desde un componente simple como un LED hasta dispositivos electrónicos más complejos como teléfonos celulares inteligentes (P. Sivagami et al., 2018). Se debe tener en cuenta que la energía recolectada por este tipo de sistemas normalmente es reducida, para las bandas de frecuencia más comunes, la potencia de las ondas de RF, usualmente menores a $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (Luo et al., 2019), por lo que se utilizan mayormente para aplicaciones que requieren baja potencia (Yathavi et al., 2021).

La eficiencia de energía en la etapa de aplicación está directamente relacionada con la impedancia del sistema. Lo que se busca es que no exista una diferencia de impedancias entre la carga y la etapa de administración de energía, de este modo no habrá potencia reflejada por lo que el coeficiente de reflexión será cero y no existirán pérdidas de potencia (Cansiz et al., 2019).

Como complemento se obtiene una app de consulta y visualización de los parámetros óptimos obtenidos para cada una de las etapas de un sistema de captación de energía según la investigación realizada, donde al pasar de la pantalla de inicio se observa las opciones de cada etapa y al seleccionar una opción, se desplegar una ventana con su descripción y parámetros óptimos, lo cual se puede observar en la figura 3.

Figura 3. Aplicación realizada a: pantalla principal, b: menú de selección, c: etapa seleccionada.



4. Conclusiones y recomendaciones

Se ha realizado un estudio comparativo de 15 sistemas de captación de energía de radiofrecuencia, extraídos de repositorios científicos alrededor del mundo. De los trabajos analizados durante el estudio se puede concluir que un sistema de captación de energía de Radiofrecuencia está conformado por 4 etapas fundamentales: Antena, Acoplamiento, Rectificación y Almacenamiento de energía, no obstante, en ciertos sistemas se incluye una etapa de: Administración de energía, con el fin de optimizar el reparto de la energía captada, ya sea hacia la batería o hacia la carga, de esta manera se puede incrementar la eficiencia del sistema.

Para la etapa de antena el diseño óptimo es la antena tipo "Microstrip patch", debido a su ganancia alta alrededor de 7.69 dBi, dimensiones reducidas en el orden de los centímetros, facilidad de diseño y proceso simple de fabricación. La frecuencia de operación de la antena la determina cada autor según sus necesidades, siendo las más utilizadas las antenas multibanda puesto que pueden captar energía de múltiples bandas de frecuencia al mismo tiempo. Para la etapa de acoplamiento el más utilizado es el tipo de acoplamiento con *stubs* puesto que es sencillo de diseñar y no ocupa demasiado espacio en un circuito, normalmente la impedancia de acoplamiento es de 50Ω . Además, para la etapa de rectificación se estudiaron 5 artículos dedicados específicamente a multiplicadores de voltaje eficientes, la topología que se recomienda utilizar es la del multiplicador de voltaje tipo Dickson con tecnología CMOS, es con esta tecnología que se realizó el multiplicador que presenta mejores resultados el cual consta de dos etapas y con una eficiencia del 74 %.

En lo que respecta a la etapa de administración de energía, se ha encontrado que usualmente se utiliza el circuito integrado BQ25504, debido a sus prestaciones y características de bajo consumo. Para la etapa de almacenamiento de energía, los componentes más utilizados son el condensador electrolítico y baterías recargables. El uso de supercondensadores podría mejorar la eficiencia de los sistemas en esta etapa debido a su mayor densidad de potencia y su capacidad de liberar su carga lentamente a diferencia de los condensadores electrolíticos comunes. Finalmente, en la etapa de aplicación algunos autores realizan pruebas exitosas al lograr encender dispositivos electrónicos pequeños como diodos LED, relojes digitales y teléfonos celulares. Se debe tener en cuenta que los sistemas de captación de energía RF son mayormente utilizados para aplicaciones de baja potencia como dispositivos de Internet de las cosas (IoT).

Los resultados obtenidos durante este trabajo investigativo servirán como base para futuros trabajos que serán realizados dentro del proyecto de investigación "Captación de energía limpia de baja potencia para alimentación de dispositivos de quinta generación (5G)" el cual actualmente se encuentra en proceso de desarrollo e implementación, pues se dispone de información científica y actualizada acerca de las etapas óptimas de sistemas de captación y almacenamiento de energía de RF. Este hecho permite abrir las puertas en direcciones de investigación orientadas en cada etapa. Por lo que como trabajos futuros tendremos, por ejemplo, desarrollo de antenas eficientes, optimización del acoplamiento de las secciones de antenas y rectificación, estrategias de administración de energía, y estudio de medios de almacenamiento adecuados. Así sucesivamente, seguirán apareciendo nuevas direcciones en el proceso de investigación, orientadas en la optimización de los sistemas de captación y almacenamiento de energía de RF.

Finalmente se realizó una aplicación para dispositivos Android en la cual consta toda la información y resultados obtenidos durante la presente investigación, mostrándose de manera

didáctica. La utilidad de la aplicación desarrollada es de proveer información científica organizada, sintetizada y actualizada al interesado acerca de Etapas óptimas de sistemas de captación y almacenamiento de energía de RF. La aplicación será actualizada de manera periódica mensual, conforme a nuevos trabajos de investigación y avances del proyecto en desarrollo con la finalidad de proveer siempre de información actualizada.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Técnica de Ambato y a la "Dirección de Investigación y Desarrollo" (DIDE) por su apoyo en la realización de esta investigación, en la ejecución del proyecto "Captación de energía limpia de baja potencia para alimentación de dispositivos de quinta generación (5G)", aprobado con resolución "N.º UTA-CONIN-2022-0015-R". Código de Proyecto de Investigación: SFFISEI 07.

Referencias

- Adnan, S., Hoq, T., Karim, Z., Alam, K., Howlader, M. y Rajkumar, R. (2019). Energy Harvesting-Technical Analysis of Evolution, Control Strategies, and Future Aspects, *Journal of Electronic Science and Technology*, 116-125. <https://doi.org/10.11989/JEST.1674-862X.80314201>
- Ali, M., Albasha, L. y Qaddoumi, N. (2013). RF energy harvesting for autonomous wireless sensor networks, *8th International Conference on Design & Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era (DTIS)*, 78-81. <http://dx.doi.org/10.1109/DTIS.2013.6527782>
- Arrawatia, M., Baghini, M.S. y Kumar, G. (2016). Broadband Bent Triangular Omnidirectional Antenna for RF Energy Harvesting, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 36-39. <http://dx.doi.org/10.1109/LAWP.2015.2427232>
- Awais, M., Rehman, S., Asif, M., Usman, M. R. y Shin, S.Y. (2019). RF Energy Harvesting for Low Power Applications Using Rectenna Operating at 2.45 GHz. *International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 789-793. <http://dx.doi.org/10.1109/ICTC46691.2019.8940014>
- Balarezo, D., Gordón, C., Cuji J. y Salazar, F. (2022). Conditioning System for an Electromagnetic Energy Collection Device. En *Advances and Applications in Computer Science, Electronics, and Industrial Engineering. CSEI 2021.. Springer, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97719-1_13
- Berrueta, A., Ursúa, A., Martín, I. S., Eftekhari, A. y Sanchis, P. (2019). Supercapacitors: Electrical Characteristics, Modeling, Applications, and Future Trends. *IEEE Access*, 50869-50896. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908558>
- Cama, Pinto, A., De la Hoz Franco, E. y Cama Pinto, D. (2012). Las redes de sensores inalámbricos y el internet de las cosas. *INGE CUC*, 8(1), 163-172.
- Cansiz, M., Altinel, D. y Kurt, G.K. (2019). "Efficiency in RF energy harvesting systems: A comprehensive review". *Elsevier*, 292-309. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.100>
- Chouhan, S., Nurmi, M., Halonen, K. (2016). Efficiency enhanced voltage multiplier circuit for RF energy harvesting. *Microelectronics Journal*, 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2015.11.012>
- Dolgov, A., Zane, R. y Popovic, Z. (2010). Power Management System for Online Low Power RF Energy Harvesting Optimization. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 57(7), 1802-1811. <http://dx.doi.org/10.1109/TCSI.2009.2034891>
- Eid, A., Costantino, J., Tak, Y., Ramadán, A., Abdalá, M., ElHajj, R., Awad, R. y Kasba del IB. (2017). An efficient RF energy harvesting system", *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 896-899. <https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928573>

- Eid, A., Hester, J., Nauroze, A., Lin, T.H., Costantine, J., Tawk, Y., Ramadan, A. H. y Tentzeris, M. (2018). A Flexible Compact Rectenna for 2.4GHz ISM Energy Harvesting Applications. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 1887-1888. <https://10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608525>
- Elahi, H., Munir, K., Eugeni, M., Atek, S. y Gaudenzi, P. (2020). Energy Harvesting towards Self-Powered IoT Devices. *Energies. MDPI AG*, 13(21), 5528. <http://dx.doi.org/10.3390/en13215528>
- Garg, N., y Garg, R. (2017). Energy harvesting in IoT devices: A survey. *2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*, 127-131. <http://dx.doi.org/10.1109/ISS1.2017.8389371>
- Martinho, D. L. (2020). *Caracterización experimental de una PMU (Power Management Unit) para aplicaciones de Energy Harvesting (EH)* [Tesis de Ingeniería], Universidad Politécnica de Catalunya.
- Gudan, K., Chemishkian, S., Hull, J., Thomas, S., Ensworth, J. y Reynolds, M. (2014). A 2.4GHz ambient RF energy harvesting system with -20dBm minimum input power and NiMH battery storage. *2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA)*, 7-12. <https://10.1109/RFID-TA.2014.6934191>
- Guerrero, C. A. (2016). *Sistema de recolección de energía (Energy Harvesting), que emplea la corriente Corona y señales de alta frecuencia* [Tesis de Maestría, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional de la universidad Nacional de Colombia <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59817>
- Haddad, P., Gosset, G., Raskin, J. y Flandre, D. (2014). Efficient ultra low power rectification at 13.56 MHz for a 10 μ A load current. *2014 SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conference (S3S)*, 1-2. <https://10.1109/S3S.2014.7028220>
- Huang, J. y Chen, S. (2016). A compact slot loop rectenna for dual-band operation at 2.4- and 5.8-GHz bands. *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 411-412. <https://10.1109/APS.2016.7695914>
- Hwang, Y., Lei, C., Yang, Y., Chen, J. y Yu, C. (2014). A 13.56 MHz Low-Voltage and Low-Control-Loss RF-DC Rectifier Utilizing Reducing Reverse Loss Technique. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 6544-6554. <https://10.1109/TPEL.2014.2304517>
- Jabbar, H., Song, Y.S. y Jeong, T.T. (2010). RF energy harvesting system and circuits for charging of mobile devices. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 247-253. <https://10.1109/TCE.2010.5439152>
- Kaur, N., Sharma, N. y Kumar, N. (2018). RF Energy Harvesting and Storage System of Rectenna: A Review". *Indian Journal of Science and Technology*, 11, 1-5. <https://10.17485/ijst/2018/v11i25/114309>
- Kim, S., y Chou, P. (2015). "Energy harvesting: Energy harvesting with supercapacitor-based energy storage", *Smart Sensors and Systems*, 215-241. https://10.1007/978-3-319-14711-6_10
- Kim, S., Vyas, R., Bito, J., Niotaki, K., Collado, A., Georgiadis, A. y Tentzeris, M. (2014). Ambient RF Energy-Harvesting Technologies for Self-Sustainable Standalone Wireless Sensor Platforms, *Proceedings of the IEEE*, 102(11): 1649-1666. <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2014.2357031>
- López, F., Torrealba, R. y Tamariz, E. I. (2015). Analysis and design of a reconfigurable antenna for ISM and GSM bands for cognitive radio applications. *2015 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*, 66-71. <https://10.1109/CONIELECOMP.2015.7086927>.
- Lu, X., Wang, P., Niyato, D., Kim, D.I. y Han, Z. (2015). Wireless Networks With RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(2), 757-789. <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2014.2368999>
- Luo, Y., Pu, L., Wang, G. y Zhao, Y. (2019). RF Energy Harvesting Wireless Communications: RF Environment, Device Hardware and Practical Issues. *MDPI*, 1-28. <https://doi.org/10.3390/s19133010>
- Mane R., Batule, B., Lomte, N. y Gundecha, A. (2020). RF Energy Harvesting using Efficient Power Management System. *2nd International Conference on Communication & Information Processing (ICCIP)*, 1-8.

- Martinez, J., A. Medina, S., Bonilla, C.A., Villegas, J. M. y Aldaz, J. C. (2020). Radio Frequency Energy Harvesting System Making Use of 180° Hybrid Couplers and Multiple Antennas to Improve the DC Output Voltage, *IEEE Latin America Transactions*, 604-612. <https://10.1109/TLA.2020.9082733>
- Martinho, D. L. (2020). Caracterización experimental de una PMU (Power Management Unit) para aplicaciones de Energy Harvesting (EH) [Tesis de Ingeniería], Universidad Politécnica de Catalunya. <http://hdl.handle.net/2117/329335>
- Mindan, B., y Hong, L. (2010). The Analysis of Impedance Matching Problem in RF Circuit Design. *2010 International Forum on Information Technology and Applications*, 350-353. <http://dx.doi.org/10.1109/IFITA.2010.55>
- Moghaddam, N.A., Maleki, A., Shirichian, M. Shirichian y Panah, N. S. Panah. (2017). RF energy harvesting system and circuits for charging of wireless devices using spectrum sensing. *4th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, 431-436. <http://dx.doi.org/10.1109/ICECS.2017.8292044>
- Nalini, M., Kumar, J.V., Kumar, R. M. y Vignesh, M. (2017). Energy harvesting and management from ambient RF radiation, *2017 International Conference on Innovations in Green Energy and Healthcare Technologies (IGEHT)*, 1-3. <https://10.1109/IGEHT.2017.8094073>
- Niotaki, K., Kim, S., Jeong, S., Collado, A., Georgiadis, A. y Tentzeris, M. (2013). A Compact Dual-Band Rectenna Using Slot-Loaded Dual Band Folded Dipole Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 1634-1637. <https://10.1109/LAWP.2013.2294200>
- Núñez, A. B. (2018). *Análisis de ventajas e inconvenientes de las baterías de flujo redox frente a las baterías de iones de litio en aplicaciones de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica* [Tesis de Maestría], Universidad de Oviedo.
- Olgun, U., Chen, C. y Volakis, J. L. (2010). Wireless power harvesting with planar rectennas for 2.45 GHz RFIDs, *2010 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory*, 329-331. <https://10.1109/URSI-EMTS.2010.5637008>
- Ong, L., Karim, M. y Nasimuddin, N. (2014). "Overview of antennas for RF energy harvesting.", *2014 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation Wireless Communications, APWC 2014*, 209-212. <https://10.1109/APWC.2014.6905541>
- Pérez, E. C. (2016). *Estudio de los supercondensadores y su viabilidad como sistema de almacenamiento energético en instalaciones fotovoltaicas* [Tesis de Grado], Universidad de Sevilla.
- Piñuela, M., Mitcheson, P. D. y Lucyszyn, S. (2013). "Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2715-2726. <https://10.1109/TMTT.2013.2262687>
- Rajshekhar, B., Motani, M., Murthy, C. y Vaze, R. (2019). Energy Harvesting Communications with Batteries Having Full-Cycle Constraints", 1-6. <https://10.1109/ICC.2019.8761228>
- Ramesh, G.P., y Rajan, A. (2014). Microstrip antenna designs for RF energy harvesting. En *International Conference on Communication and Signal Processing* (pp. 1653-1657). <https://10.1109/ICCSP.2014.6950129>
- Rodríguez, A., Cruz, F. y Ramos, R. Z. (2015). Design of 900 Mhz AC to DC Converter Using Native Cmos Device of TSMC 0.18 Micron Technology for RF Energy Harvest Applicatio. *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 99-105. <https://10.13189/ujeee.2015.030306>
- Sari, F y Uzun, Y. (2019). A comparative study: Voltage multipliers for rf energy harvesting system, *61(1)*, 12-23. <https://10.33769/aupse.469183>
- Scheeler, R., Korhummel, S. y Popovic, Z. (2014). A Dual-Frequency Ultralow-Power Efficient 0.5-g Rectenna. *IEEE Microwave Magazine*, 15(1), 109-114. <https://10.1109/MMM.2013.2288836>
- Scorcioni, S., Larcher, L. y Bertacchini, A. (2012). Optimized CMOS RF-DC converters for remote wireless powering of RFID applications. *2012 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, 47-53. <https://10.1109/RFID.2012.6193055>
- Sharma, P., y Bhatti, T. S. (2010). A review on electrochemical double-layer capacitors. *Energy Conversion and Management*, 2901-2912. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.031>
- Shinki, Y., Shibata, K., Mansour, M. y Kanaya, H. (2017). Impedance Matching Antenna-Integrated High-Efficiency Energy Harvesting Circuit. *Sensors* 17(8): 1763. <https://doi.org/10.3390/s17081763>

- Sivagami, P., Pushpavalli, M., Abirami, P., Sindhuja, S. y Reddy, N. S. (2018). Implementation Of RF Energy Harvesting For Mobile Charging. *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICIC)*, 1-4. <https://10.1109/ICIC.2018.8782427>
- Song, C., Huang, Y., Zhou, J., Zhang, J., Yuan, S. y Carter, P. (2015). A High-Efficiency Broadband Rectenna for Ambient Wireless Energy Harvesting. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 3486-3495. <https://10.1109/TAP.2015.2431719>
- Sun, H., Guo, Y., He, M. y Zhong, Z. (2012). Design of a High-Efficiency 2.45-GHz Rectenna for Low-Input-Power Energy Harvesting. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 929-932. <https://10.1109/LAWP.2012.221223>
- Sun, H., Guo, Y., He, M. y Zhong, Z. (2013). A Dual-Band Rectenna Using Broadband Yagi Antenna Array for Ambient RF Power Harvestin. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 918-921. <https://10.1109/LAWP.2013.2272873>
- Takhedmit, H., Cirio, L., Costa, F. y Picon, O. (2014). Transparent rectenna and rectenna array for RF energy harvesting at 2.45 GHz. *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, 2970-2972. <http://dx.doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6902451>
- Tobar, Y. (2021). Implementación de algoritmos y protocolos de ahorro energético en redes de sensores inalámbricos [Tesis de maestría]. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Tony, A., y Hiryanto, L. (2019). A review on energy harvesting and storage for rechargeable wireless sensor networks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 508(1), 651-654. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/508/1/012120>
- Torrealba, R., Santiesteban, V. C., Ambrosio, R., Gomez, L. y Flores, E. (2016). Sistema de cosechamiento de energía con radio frecuencia. *SOMI XXXI*, 1-6.
- Wang, W., Chen, X. y Wong, H. (2015). Analysis and design of CMOS full-wave rectifying charge pump for RF energy harvesting applications. *TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference*, 1-4. <https://10.1109/TENCON.2015.7372865>
- Yathavi, OT., Maunasree, K., Meenakshi, G.B., Malika, M. V. y Santhoshini, M. (2021). RF Energy Harvesting for Low Power Applications. *2021 10th International Conference on Internet of Everything, Microwave Engineering, Communication and Networks (IEMECON)*, 1-6. <https://10.1109/IEMECON53809.2021.9689155>
- Zeng, M., Andrenko, A., Liu, X., Li, Z. y Tan, H. (2017). A Compact Fractal Loop Rectenna for RF Energy Harvesting. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2424-2427. <https://10.1109/LAWP.2017.2722460>
- Zeng, M., Andrenko, A., Liu, X., Tan, H. y Zhu, B. (2016). Design of fractal loop antenna with integrated ground plane for RF energy harvesting. *EEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*, 384-387. <https://10.1109/MMET.2016.7543970>
- Zeng, Z., Shen, S., Wang, B., Estrada, J.J., Murch, R. y Sánchez, E. (2020). An Ultra-low-power Power Management Circuit with Output Bootstrapping and Reverse Leakage Reduction Function for RF Energy Harvesting. *2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 1059-1062. <http://dx.doi.org/10.1109/IMS30576.2020.9224098>
- Zhang, H., Wang, J. y Qian, L. (2020). Low Input Power Management Circuit for Ambient Energy Harvesting. *2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, 1-3. <https://10.1109/IWS49314.2020.9360051>