

ESTRATEGIAS PARA LA ALIMENTACIÓN CONTINUA DE NODOS SENSORES INALÁMBRICOS EN ESPACIOS INTERIORES

Hazas Izquierdo, Raúl Gilberto, Hoyo Montaña, José Antonio
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Hermosillo
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Av. Tecnológico S/N, Col. El Sahuaro, Hermosillo Sonora 83079
Teléfono+52 662 260 6500
e-mail rhazas@gmail.com, jose.hoyom@hermosillo.tecnm.mx

RESUMEN.

Las redes inalámbricas de sensores (WSN, por sus siglas en inglés) constituyen el elemento fundamental del Internet de las Cosas al integrar sistemas de monitoreo para automatización de viviendas, sistemas de gestión de energía, atención médica, entre otros. No obstante, la operación de la red se ve limitada debido a la alimentación de los nodos mediante baterías. Últimamente ha habido un gran énfasis en la cosecha de energía dentro de la literatura científica como una manera de extender la vida útil de la red. En este artículo se analizan posibles fuentes de energía dentro de ambientes interiores. Se identificó a la cosecha de energía de RF mediante una rectena como la opción más apropiada a los requerimientos de la esfera de interés. Se evaluó la eficiencia de diseños previos de rectenas y se propone una solución que resuelve deficiencias previas: bajos voltajes de salida y reducción de armónicos resultantes de la rectificación.

Palabras Clave: redes inalámbricas de sensores, cosecha de energía, rectenas, multiplicadores tipo Grenacher.

ABSTRACT.

Wireless sensor networks (WSN) play a major role as the building block for the Internet of Things (IoT) enabling systems for monitoring purposes being home automation, building energy management, healthcare, among others. Yet, their operation is hampered by energy challenges due to battery powering for the sensing nodes. Currently, there has been ample emphasis in the literature on energy harvesting as a means to maintaining the network lifetime. Suitable energy sources have been analyzed within the design domain of indoor dwellings. RF energy harvesting by means of a rectenna has been identified as the better fit to the domain's requirements. Later, an evaluation of the efficiency and output voltage of previous rectennas designs has been performed, and a new proposal that might solve two of previous solutions' drawbacks: low output voltage and rectification-resulting harmonics that compromise the overall efficiency, is proposed.

Keywords: wireless sensor networks, energy harvesting, rectennas, Grenacher multipliers.

1. INTRODUCCIÓN

Los avances en las comunicaciones inalámbricas, los sensores y controladores de bajo consumo de potencia y tecnologías afines han permitido la instalación eficiente de redes inalámbricas de sensores (WSN, por sus siglas en inglés), en una gran variedad de aplicaciones de monitoreo [1, 2]. Un ejemplo de ello son los

sistemas de administración de energía (Building Energy Management Systems o BEMS, por sus siglas en inglés) donde las redes WSN cumplen varias tareas de monitoreo que permiten conocer el comportamiento de los ocupantes de los edificios de manera que se pueda prever y gestionar la carga energética de los mismos [3, 4]. Los nodos sensores, dependiendo de su tamaño y función (p.ej.: señalización, procesamiento de datos, entre otros) se ven limitados por un lado en cuanto al tamaño de batería que puedan emplear, y por el otro, a la baja o nula posibilidad de recargar dicha batería, volviéndose inservibles una vez que se agota la energía disponible. En este trabajo se hace una reseña de esquemas de cosecha de energía para extender la vida útil de los nodos sensores de una red WSN y los requerimientos en el ámbito de espacios interiores. Se identifican las fuentes de energía disponibles y esfuerzos previos de cosecha de energía de radiofrecuencia (RF). Por último, se plantea una solución que resuelva carencias previas.

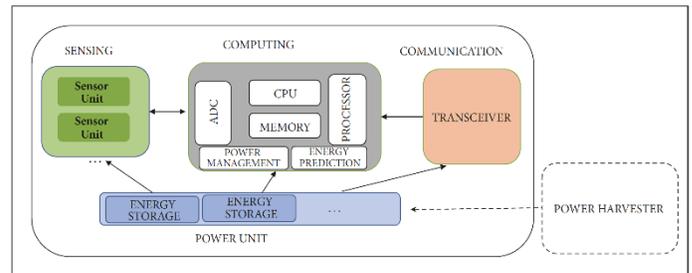


Figura 1 Arquitectura típica de un nodo sensor inalámbrico (tomado de [5])

2. ALIMENTACIÓN DE NODOS SENSORES

2.1. Vida útil.

Un nodo sensor típicamente consta de cuatro subsistemas: i) sensores para la adquisición de datos, ii) procesamiento para el tratamiento local de los datos, iii) comunicación inalámbrica, y iv) potencia, generalmente una batería con una capacidad limitada, a fin de no incrementar el volumen y/o el peso del nodo sensor (ver figura 1). Se define como la vida útil de una red WSN al lapso que transcurre desde la instalación de esta hasta el instante en que deja de ser funcional. Dicha condición

dependerá del propósito de la WSN y pudiera caracterizarse por tres condiciones: el instante en que falle el primer sensor, el momento en que falle un porcentaje dado de sensores o la partición de la red o la pérdida de cobertura [6]. Por lo tanto, a fin de extender el tiempo de vida de una red WSN es menester maximizar la eficiencia de energía ya sea optimizando el ciclo de trabajo, el tipo de datos que se procesan localmente u optimizando la comunicación entre nodos [1, 2, 7], o proveer mecanismos de cosecha de energía que obtengan la energía de fuentes existentes en el medio ambiente y la conviertan en energía eléctrica [8].

2.2. Fuentes de energía ambiental.

La cantidad de energía y la tasa de cosecha respecto del tiempo son los parámetros críticos que considerar en el diseño de un sistema de cosecha de energía. Como ejemplo del comportamiento de las diferentes fuentes de energía, puede tomarse la cosecha de energía solar: la fuente de energía es predecible e incontrolable. Para las fuentes controlables, por otro lado, la energía estará disponible siempre que se requiera. Para aquellas fuentes de energía incontrolables, la energía será cosechada cuando se disponga de ella. En base a lo anterior, las fuentes de energía pueden ser clasificadas con respecto a las características de predictibilidad y controlabilidad, tal como se muestra en la Tabla 1 [9].

Tabla 1 Características de las diferentes fuentes de energía ambiental (adaptado de [9]).

Fuente		Predecible	Impredecible	Controlable	Incontrolable
RF		X		X	
Solar		X			X
Térmica			X	X	
Fluida	Eólica	X			X
	Hidráulica	X			X
Mecánica	Vibratoria		X	X	
	Presión		X	X	
	Tensión-deformación		X	X	
Humana	Actividad		X	X	
	Fisiológica		X		X

2.3. Ámbito de espacios interiores.

A fin de ubicar una red WSN dentro del ámbito de diseño aplicable a espacios interiores y a partir de ello escoger los esquemas de cosecha de energía, se debe clasificar primeramente de acuerdo con criterios tales como el procedimiento de instalación, movilidad de los nodos,

heterogeneidad, costo de los sensores, infraestructura, entre otros [10]. Como un ejemplo de la aplicación de los criterios anteriores, Kappler [11] realizó la clasificación de una red WSN para el monitoreo del consumo de energía de la red eléctrica¹, como se muestra en la Tabla 2.

2.4. Criterios de selección.

Para asegurar la operación de una red WSN en espacios interiores, es necesario alimentar múltiples nodos sensores inalámbricos cuyo mantenimiento pudiera resultar complicado, costoso y probablemente nocivo para el ambiente [12]. No obstante, dichos sensores usualmente requieren de ciclos de trabajo muy cortos (milisegundos) y bajos requerimientos de potencia del orden de milivatios [13, 14]. Tomando en cuenta la información de las tablas y las condiciones anteriores, se pueden esbozar los siguientes criterios para seleccionar la fuente de energía cosechable más adecuada [15]:

- **Energía fotovoltaica:** Los bajos niveles de energía obtenida por iluminación en interiores hacen desafiante la aplicación de cosecha fotovoltaica en estos ambientes.
- **Energía vibracional:** La cantidad de energía obtenida por vibración es proporcional al tamaño de los generadores. En redes WSN donde se requieren nodos de pequeñas dimensiones, la generación mediante vibración puede no ser la más adecuada.
- **Energía térmica:** es posible imaginar aplicaciones de monitoreo donde existan gradientes de temperatura tales que permitan la generación de suficiente energía para alimentar sensores de redes WSN.
- Dado el gran número de radio transmisores existentes en un ambiente interior y los bajos requerimientos de potencia de los sensores, la cosecha de **energía de RF** es la fuente de energía más atractiva.

3. COSECHA DE ENERGÍA DE RF.

3.1. Rectena.

La extracción de energía de las transmisiones de RF ha recibido amplia cobertura en las dos últimas décadas debido a la omnipresencia de la telefonía celular, los dispositivos Bluetooth y las redes Wifi [5, 10, 15]. El elemento clave de un dispositivo de cosecha de energía RF es la “rectena” (del inglés RECTifying anTENNA). El concepto de la rectena fue originalmente propuesto por William C. Brown de la compañía Raytheon Co. en la década de los 60 [16]. La transmisión inalámbrica de energía no era un concepto nuevo pues ya se había manifestado

Tabla 2 Requerimientos para el diseño de una red WSN en espacios interiores (adaptado de [10])

Instalación	Movilidad	Tamaño del sensor	Costo del sensor	Fuente de Energía	Heterogeneidad	Mecanismo de comunicación	Infraestructura	Topología de red	Cobertura	Conectividad	Tamaño	Vida útil
Manual e iterativa	conectados a la red eléctrica en nodos de ser alimentados por baterías o cosechadores de energía	Caja de fosforos	~\$10-\$100 US	Red eléctrica (de energía)	Nodos sensores y administrador de instalación	Radio frecuencia	Basada en nodos sumidero	En capas, con múltiples saltos	Esparcida	Siempre conectada	10s-100s de nodos	Años

costo de la red, toda vez que el cambio de ubicación de uno o varios nodos sensores implicaría un gasto logístico importante.

por las demostraciones de Nicolas Tesla a finales del siglo XIX [17].

Una rectena, figura 2, se compone de cuatro elementos: una antena estándar, un filtro de entrada/acoplador de impedancia, un rectificador/multiplicador y un filtro de salida/dispositivo de almacenamiento de la CD resultante (supercapacitor, por ejemplo) [18]. El empleo de cierto tipo de antenas y de técnicas de miniaturización optimizadas para la banda de frecuencias industriales, científicas y médicas (ISM, por sus siglas en inglés) puede brindar una solución robusta y a la medida [19, 20].

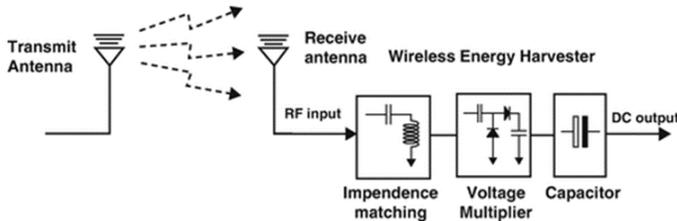


Figura 2 Una rectena (par rectificador-antena) (adaptado de [5]).

3.2. Antena.

El objetivo en el diseño de la antena es maximizar la eficiencia de esta. Valores y rangos típicos de energía de RF incidente en los trabajos consultados van de -20dBm a 10dBm, resultando en potencias de CD convertida en un rango de -44dBm a 2.8dBm (véase figura 3). Ante estos niveles de energía resultante, es imperativo incrementar la ganancia de la antena receptora a fin de mejorar los niveles de energía cosechada. Debido a la relativa facilidad para su construcción y caracterización, un buen número de autores ha preferido el uso de una antena de dipolo con un rectificador en shunt (ver figura 4) [21-28]. Sin embargo, en los últimos años se han propuesto otras arquitecturas a fin de obtener mayor eficiencia. Entre estas se encuentran el microstrip [29-31], espiral equiangular [32], el micro parche [33-35], la antena de polarización circular [36], el parche de anillo [37], el parche de anillo ranurado cortocircuitado [38], la antena plana F invertida [39] o antena de anillo ranurado doble [40]. En general, considerando la evolución de las eficiencias reportadas, el diseño apropiado de la antena y el adecuado acoplamiento con el diodo y la carga de CD, la eficiencia puede a menudo alcanzar entre el 70 y el 90% como lo muestra la figura 5 [41].

A pesar de los niveles de eficiencia mostrados, los voltajes de CD que se obtienen rara vez sobrepasan 1 V (ver figura 6) a menos que se utilicen arreglos de antenas interconectados para sumar las respectivas salidas [35]. Esta última solución no es explorada en este artículo pues violaría el requerimiento de las dimensiones del sensor y, por ende, red WSN que se enumeró en la Tabla 2.

3.3. Rectificadores.

Diferentes topologías se han probado para incrementar el voltaje que puede rectificarse de la energía incidente, figura 7. En los casos de los diodos conectados en shunt, en serie o como duplicadores de voltaje, se obtiene una rectificación de media onda. La discontinuidad en la señal rectificada genera armónicos que merman la eficiencia de la rectena, tal como se muestra en la figura 8.

4. MULTIPLICADORES DE VOLTAJE

Una posible solución al problema de obtener mayores voltajes de salida sin menoscabar la eficiencia de la etapa de rectificación sería emplear multiplicadores tipo Grenacher [42-44]. La simulación en la figura 9 así parece confirmarlo pues se multiplica el voltaje sin que se generen armónicos.

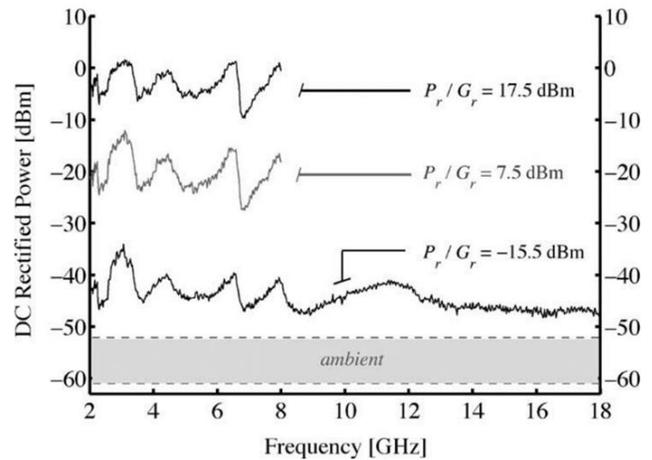


Figura 3 Respuesta a diferentes niveles de energía incidente (tomada de [32]).

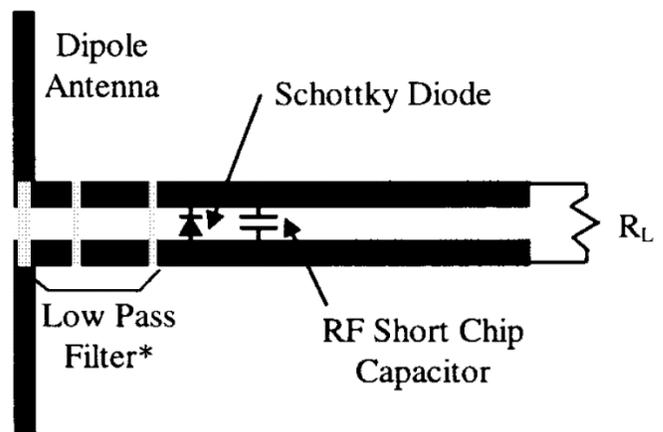


Figura 4 Rectena de 5.8 GHz con antena dipolo. Longitud del dipolo 26 mm aprox. (tomado de [25]).

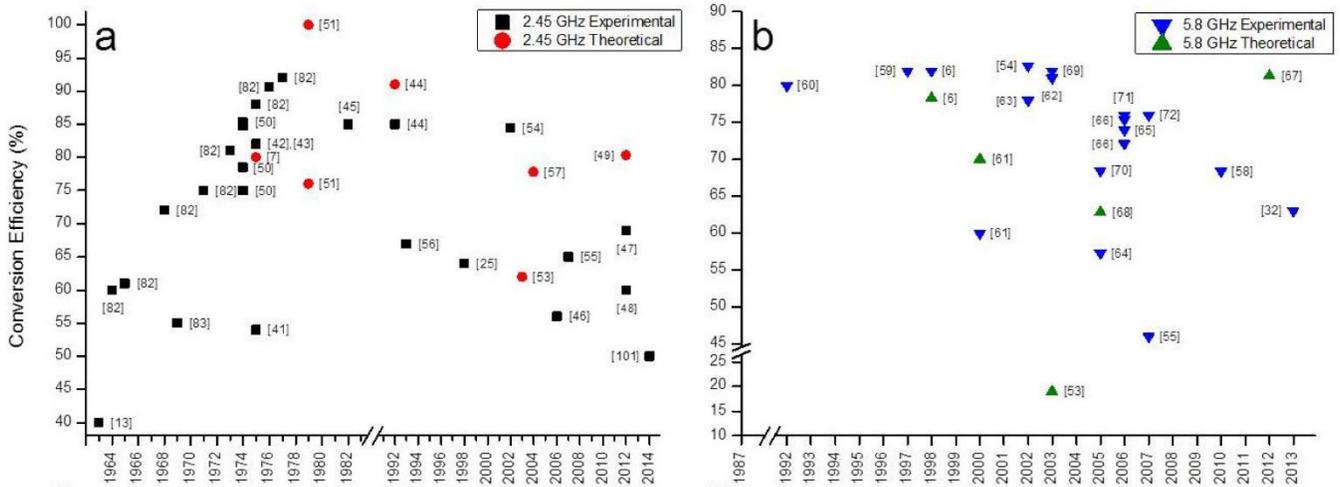


Figura 5 Evolución de la eficiencia de conversión (adaptado de [41])

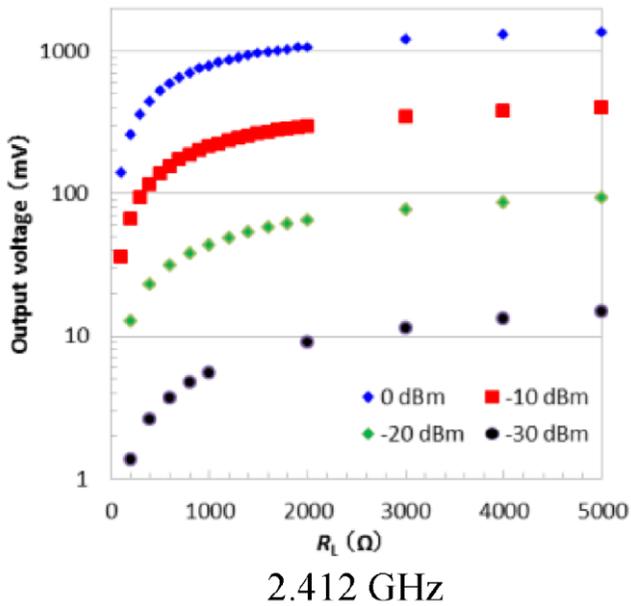
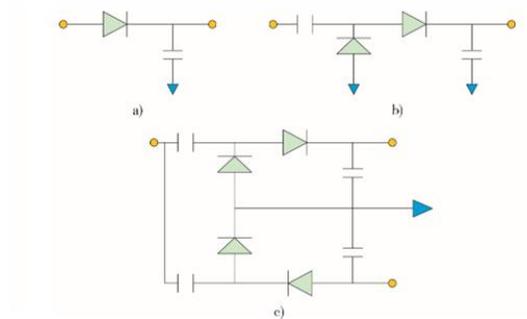


Figura 6 Voltaje de salida de rectificador (tomado de [35])



a) Serie, b) Duplicador de voltaje, c) Grenacher

Figura 7 Topologías de rectificadores (adaptado de [45])

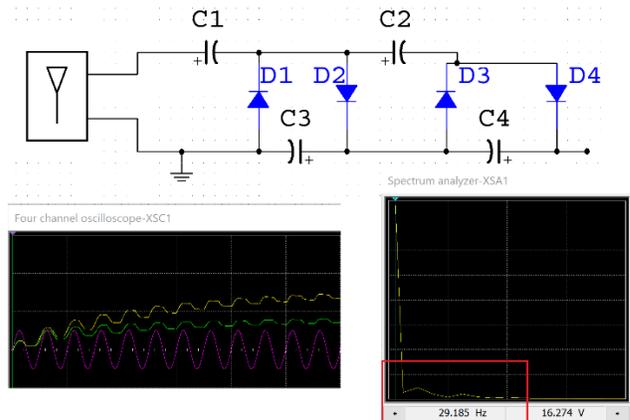


Figura 8 Simulación de duplicador de voltaje (armónicos en el recuadro rojo).

Idealmente, se puede pensar en incrementar el número de multiplicadores conectándolos en cascada sin mayores complicaciones. Sin embargo, aún si tomamos en cuenta las caídas de voltaje a través de cada diodo, no es posible mantener la tendencia ascendente de manera indefinida toda vez que la antena solo puede cosechar un nivel de energía limitada [28], por lo que el número de multiplicadores debiera incrementarse de manera cautelosa, toda vez que la eficiencia pico de conversión está limitada por el voltaje de ruptura de los diodos Schottky empleados [23].

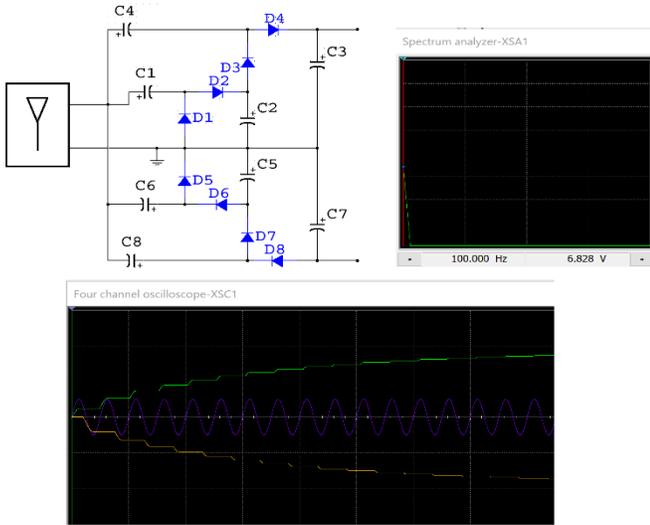
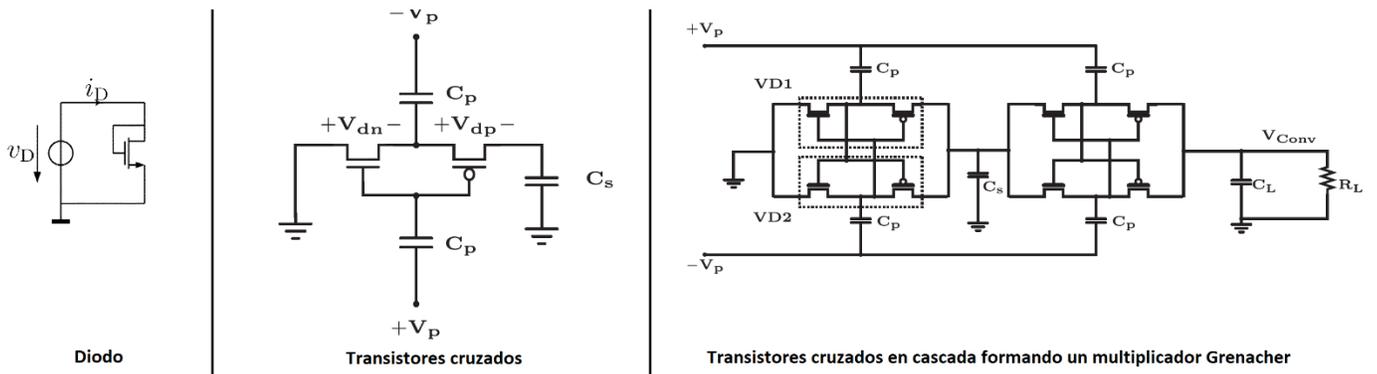


Figura 9 Simulación de multiplicador de voltaje tipo Grenacher.

Curtis et al [42] reconocen que no existe un modelo analítico lo suficientemente preciso para hacer frente a todos los posibles modos de operación de los diodos y por ende es difícil predecir el comportamiento de los rectificadores con bajos niveles de energía de entrada. Es por ello que estos y otros autores decidieron utilizar transistores CMOS conectados como diodos o como rectificadores por acoplamiento cruzado [28, 42-44] figura 10.

5. CONCLUSIONES

Figura 10 Transistores MOS como rectificadores (adaptado de [42 y 44]).



Se analizaron las diferentes fuentes de energía ambiente capaces de ser utilizadas en ambientes interiores. Se identificó la cosecha de energía de RF como la opción que mejor cumple los requerimientos de nodos sensores inalámbricos en ámbitos de espacios interiores. Se examinaron los mecanismos para maximizar la eficiencia de conversión de energía, en particular los multiplicadores de voltaje dado el déficit en el voltaje de salida de diferentes implementaciones. Se identificó que el multiplicador tipo Grenacher puede lograr voltajes de CD mayores a 1.5V. En trabajos futuros se desarrollará un modelo analítico basado en diodos de microondas Schottky que permita la implementación de la rectena dada la ubicuidad de este tipo de diodos.

6. REFERENCIAS

- [1] César Roberto Encinas Realivazquez, Erica Cecilia Ruiz Ibarra, Adolfo Espinoza Ruiz, Armando García Berumen, Ramón René Palacio Cinco, Joaquín Cortez González, “Desarrollo de Proyectos con Internet de las cosas”, Primera edición, *Pearson Educación de México, S.A. de C.V.*, México, 2018.
- [2] Roberto Verdone, Davide Dardari, Gianluca Mazzini and Andrea Conti, “Wireless Sensor and Actuator Networks: Technologies, Analysis and Design”, *Academic Press*, Great Britain, 2008.
- [3] Kazmi Aqeel H., Michael J. O’Grady, Declan T. Delaney, Antonio G. Ruzzelli, and Gregory M. P. O’hare, “A Review of Wireless-Sensor-Network-Enabled Building Energy Management Systems”, *ACM Transactions on Sensor Networks*, Volume: 10, Issue:4, Article: 66, Jun. 2014.
- [4] Nugraha, G. Musa, A., Cho, J., Park, K., and Choi D., “Lambda-Based Data Processing Architecture for Two-Level Load Forecasting in Residential Buildings”, *Energies*, Volume: 11, Issue: 4, 772, Mar. 2018.
- [5] Mihajlovic, V. Milosavljevic, A. Joza, and M. Damjanovic, “Modular WSN node for environmental monitoring with energy harvesting support,” in *2017 Zooming Innovation in Consumer Electronics International Conference (ZINC)*, IEEE, 2017, pp. 41–44.
- [6] Chen, Y., and Zhao Q., “On the Lifetime of Wireless Sensor Networks”, *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 11, Nov. 2005.
- [7] Ayadi, H., Zouinkhi, A., Val, T., Van den Bossche, A., and Abdelkrim, M.N., “Network Lifetime Management in Wireless Sensor Networks”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, No. 15, Aug. 1, 2018.
- [8] Felicia Engmann, Ferdinand A. Katsriku, Jamal-Deen Abdulai, K.S. Adu-Manu, and Frank K. Banaseka, “Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Networks: A Review of Current Techniques”, *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, Article ID 8035065, 23 pages, Wiley-Hindawi, <https://doi.org/10.1155/2018/8035065>.
- [9] Shaikh, F.K., and Zeadally, S., “Energy harvesting in wireless sensor

- networks: A comprehensive review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 1041-1054, Elsevier, 2016.
- [10] Romer, K., and Mattern, F., “The design space of wireless sensor networks”, *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, issue: 6, pp. 54-61, Dec. 2004.
- [11] Kappler C., Riegel G. (2004) A Real-World, Simple Wireless Sensor Network for Monitoring Electrical Energy Consumption. In: Karl H., Willig A., Willig A. (eds) *Wireless Sensor Networks. EWSN 2004. Lecture Notes in Computer Science*, vol 2920. Springer, Berlin, Heidelberg
- [12] Dr. P. C. Jain, “Recent Trends in Energy Harvesting for Green Wireless Sensor Networks”, *2015 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSC)*, IEEE, 2015.
- [13] Akhtar, F., and Rehmani, M.H. “Energy replenishment using renewable and traditional energy resources for sustainable wireless sensor networks: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol: 45, pp. 769-784, Elsevier, May 2015.
- [14] A.S.M. Zahid Kausar, Reza, A.W., Saleh, M.U., and Ramiah, H., “Energizing wireless sensor networks by energy harvesting systems: Scopes, challenges and approaches”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 973-989, Elsevier, 2014.
- [15] Gilbert James M., and Farooq Balouchi, “Comparison of Energy Harvesting Systems for Wireless Sensor Networks”, *IEEE International Journal of Automation and Computing*, Volume: 5, Issue: 4, pp. 334-347, Oct. 2008.
- [16] Brown, W.C., “The History of Power Transmission by Radio Waves”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 32, No. 9, Sep. 1984, pp. 1230-1242.
- [17] N. Tesla, “The transmission of electrical energy without wires as a means for furthering peace,” in *Electrical World and Engineer*, vol. 1. Jan. 1905, pp. 21-24, [en línea] disponible: <https://oxca.pw/index449630.pdf>, visitado 02/06/20.
- [18] Brinster, I., Lohn, J., Linden, D., “An Evolved Rectenna For Sensor Networks”, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2013.
- [19] Bhatti, N.A., Alizai, M.H., Syed, A.A., Mottola, L., “Energy Harvesting and Wireless Transfer in Sensor Network Applications: Concepts and Experiences”, *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol.:12, issue: 3, Article 24, Aug. 2016.
- [20] Varghese, B., Easow John, N., Sreelal, S., Gopal, K., “Design and development of an RF energy harvesting wireless sensor node (EH-WSN) for aerospace applications”, *Procedia Computer Science*, 93 (2016) 230 – 237.
- [21] Mitcheson, P.D., Lucyszyn, S., Pinuela-Rangel, M., Yates, D.C., Drayson Technologies Limited, 2016, RF Energy Harvester, US Patent 2016/0181873 A1.
- [22] Zhang, X., et al. “Two-dimensional MoS₂-enabled flexible rectenna for Wi-Fi-band wireless energy harvesting”, *Nature*, Vol. 566, Feb. 2019, pp. 368-372.
- [23] Nahas, J.J., “Modeling and Computer Simulation of a Microwave to DC Energy Conversion Element”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 23, No. 12, Dec. 1975, pp. 1030-1035.
- [24] Yoo, T.W., and Chang, K., “Theoretical and Experimental Development of 10 and 35 GHz Rectennas”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 40, No. 6, Jun. 1992, pp. 1259-1266.
- [25] McSpadden, J.O., Fan, L., Chang, K., “Design and Experiments of a High Conversion Efficiency 5.8- GHz Rectenna”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 46, No. 12, Dec. 1998, pp. 2053-2060.
- [26] Suh, Y.H., Chang, K., “A High Efficiency Dual Frequency Rectenna for 2.45- and 5.8-GHz Wireless Power Transmission”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 50, No. 7, Jul. 2002, pp. 1784-1789.
- [27] Eid, A., Hester, J., Constantine, J., Tawk, Y., Ramadan, A.H., Tentzeris, M.M., “A Compact Source-Load Agnostic Flexible Rectenna Topology For IoT Devices”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 68, No. 4, Apr. 2020, pp. 2621-2629.
- [28] Fan, S., Yuan, Z., Gou, W., Zhao, Y., Song, C., Huang, Y., Zhou, J., Geng, L., “A 2.45 GHz Rectifier Booster Regulator With Impedance Matching Converters For Wireless Energy Harvesting”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 67, No. 9, Sep. 2019, pp. 3833-3843.
- [29] McSpadden, J., Yoo, T.W., and Chang, K., “Theoretical and Experimental Investigation of a Rectenna Element for Microwave Power Transmission”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 40, No. 12, Dec. 1992, pp. 2359-2366.
- [30] Akkermans, J.A.G., Van Beurden, M.C., Doodeman, G.J.N., Visser, H.J., “Analytical Models for Low Power Rectenna Design”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 4, 2005, pp. 187-190.
- [31] Sun, H.C., Guo, Y.X., Zhong, Z., “A High Sensitivity 2.45 GHz Rectenna For Low Input Power Energy Harvesting”, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2012.
- [32] Hagerty, J.A., Helmbrecht, F., McCalpin, W.H., Zane, R., Popović, Z.B., “Recycling Ambient Microwave Energy with Broad-Band Rectenna Arrays”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 52, No. 3, Jul. 2004, pp. 1014-1789.
- [33] Nie, M.J., Yang, X.X., Tan, G.N., Han, B., “A Compact 2.45-GHz Broadband Rectenna Using Grounded Coplanar Waveguide”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 14, 2015, pp. 986-989.
- [34] Yang, X.X., Jiagn, C., Elsherbeni, A.Z., Yang, F., Wang, Y.Q., “A Novel Compact Printed Rectenna For Data Communication Systems”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 61, No. 5, May 2013, pp. 2532-2539.
- [35] Huang, Y., Shinohara, N., Toromura, H., “A Wideband Rectenna for 2.4 GHz Band RF Energy Harvesting”, *IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, 2016.
- [36] Ren, Y.J., Chang, K., “New 5.8-GHz Circularly Polarized Retrodirective Rectenna Arrays for Wireless Power Transmission”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, No. 7, Jul. 2006, pp. 2970-2976.
- [37] Bai, X., Zhang, J.W., Xu, L.J., “Design of RF Energy Harvesting and Transfer System”, *IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, 2018.
- [38] Takhedmit, H., Cirio, L., Bellal, S., Delcroix, D., Picon, O., “Compact and Efficient 2.45 GHz Circularly Polarised Shorted Ring-Slot Rectenna”, *IET Electronic Letters*, Vol. 48, No. 5, March 1, 2012, pp. 253- 254.
- [39] Brinster, I., Lohn, J., Linden, D., “An Evolved Rectenna For Sensor Networks”, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2013.
- [40] Ren, Y.J., Farooqui, M.F., Chang, K., “A Compact Dual Frequency Rectifying Antenna with High Orders Harmonic Rejection”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 55, No. 7, Jul. 2007, pp. 2110-2113.
- [41] Donchev, E., et al, “The Rectenna Device – from theory to practice (a Review)”, *Materials Research Society Energy & Sustainability – A Review Journal*, 1, 2014. Doi:10.1557/mre.2014.6. Official URL: <http://dx.doi.org/10.1557/mre.2014.6>.
- [42] Curty, J.P., Joehl, N., Krummenacher, F., Dehollain, C., Declerq, M.J., “A Model for μ -Power Rectifier Analysis and Design”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, Vol. 52, No. 12, Dec. 2005.
- [43] Chouhan, S.S., Nurmi, M., Halonen, K., “Efficiency Enhanced Voltage Multiplier Circuit for RF Energy Harvesting”, *Microelectronics Journal*, Vol. 48, 2016, pp. 95-102.
- [44] Li, Z., Li, J., Zhou, J., Zhao, F., Wen “Ultra Low Power High Efficiency UHF Band Wireless Energy Harvesting Circuit Design and Experiment”, *ZTE Communications*, Vol. 16, No. 1, pp. 2-10. doi: 10.3969/j.issn.1673-5188.2018.01