

COMPARACION DE CIRCUITOS MULTIPLICADORES DE VOLTAJE PARA COSECHA DE ENERGIA EN RF

COMPARISON OF VOLTAGE MULTIPLIER CIRCUITS FOR RF ENERGY HARVEST

Diana Magally Barrón Longoria

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
magy_long15@hotmail.com

Enrique Stevens-Navarro

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

Armando Arce Casas

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
armando.arce@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: 28/octubre/2020

Aceptación: 3/diciembre/2020

Resumen

En los tiempos actuales con la creciente contaminación ambiental la cosecha de energía en Radio Frecuencia (RF), brinda la oportunidad de crear dispositivos inalámbricos autosustentables capaces de aprovechar los recursos de energía que abundan en la atmósfera, lo anterior convierte a la cosecha de energía en una fuente de energía limpia y amigable para el medio ambiente. Para un sistema de cosecha de energía, la eficiencia de un cosechador de energía depende de diversas etapas, una de los más importantes es el proceso de rectificación y multiplicación de voltaje. En este trabajo se analiza la salida de voltaje de dos multiplicadores de voltaje propuestos para la cosecha de energía, el multiplicador Dickson y el multiplicador Cockcroft-Walton. El análisis se realiza de una potencia de -20 a 20 dbm, con resistencias de carga de 1,000, 10,000 y 100,000 Ω obteniendo un voltaje de salida

similar para ambos multiplicadores de voltaje, sin embargo, se obtuvo una mayor eficiencia para una potencia de entrada de 10 dBm.

Palabras Clave: Cosecha de energía, eficiencia, multiplicador de voltaje.

Abstract

In today's time with increasing environmental pollution, the harvesting of energy in Radio Frequency (RF) provides the opportunity to create self-sustaining wireless devices capable of leveraging the energy resources that abound in the atmosphere, making energy harvesting a clean and environmentally friendly source of energy. For an energy harvesting system, the efficiency of an energy harvester of various parameters, one of the most important is the process of rectification and multiplication of voltage. This work analyzes the voltage output of two voltage multipliers, the Dickson multiplier and the Cockcroft-Walton multiplier. The analysis is performed from a power of -20 to 20 dbm, with load resistors of 1,000, 10,000 and 100,000 Ω obtaining a similar output voltage for both voltage multipliers, however, a higher efficiency was obtained for an input power of 10 dBm.

Keywords: energy harvesting, voltage multiplier, efficiency.

1. Introducción

La idea principal de la cosecha de energía es capturar la energía de las ondas de radio. La energía recolectada se puede utilizar para dispositivos eléctricos de voltaje pequeño. En las últimas décadas se han realizado distintas investigaciones en la recolección de energía en RF, en este contexto se han descubierto y probado técnicas en diversas circunstancias para mejorar los sistemas de captación de RF [Tran, 2017]. El concepto de recolección de energía inalámbrica fue concebido por Nikola Tesla y Heinrich Hertz en 1950. El concepto era irradiar energía inalámbrica al espacio libre y convertirla en corriente continua [Srinivasu, 2019].

Un sistema de recolección o de cosecha de energía es una unidad que convierte la potencia de las ondas de RF en energía de corriente directa (CD). El objetivo principal del sistema de recolección de energía de RF es convertirla en energía eléctrica utilizable [Tran, 2017].

La energía de RF es abundante en nuestro entorno (por ejemplo, internet inalámbrico, estaciones satelitales, estaciones de radio, servicios de transmisión digital inalámbrica), esto proporcionaría la oportunidad de reemplazar las baterías convencionales con un periodo de vida útil limitada, con un sistema que proporcione a los dispositivos la capacidad de ser autosustentables [Tran, 2017].

En la cosecha de energía las ondas radiadas en el rango de frecuencia de 3 kHz a 300 GHz se utilizan como portadores de energía, ya que esta energía está disponible tanto en interiores como exteriores, en zonas rurales y urbanas, durante todo el día. En consecuencia, la cosecha de energía en RF ha encontrado sus aplicaciones rápidamente en varias formas, como redes inalámbricas de sensores y sistemas de carga inalámbricos [Srinivasu, 2019].

2. Métodos

Un sistema para cosecha de energía está formado por tres bloques principales: La antena receptora, el adaptador de impedancias, el rectificador/multiplicador de voltaje. Como se muestra en la figura 1.

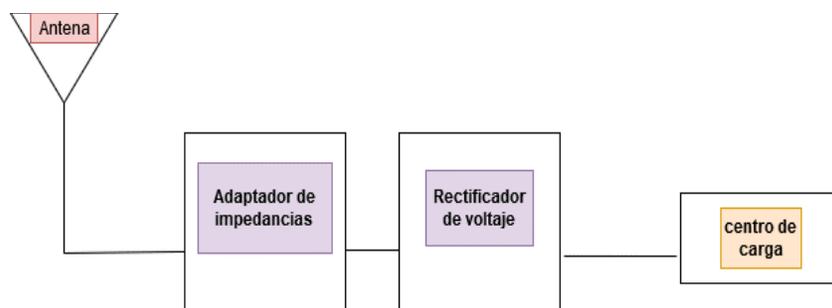


Figura 1 Sistema para cosecha de energía en RF.

La cantidad de potencia transferida de la antena al multiplicador de voltaje es muy pequeña y trabaja a grandes frecuencias debido a esto, el sistema debe estar acoplado con un adaptador de impedancias en el centro que permita la máxima transferencia de potencia. Por su parte, el multiplicador de voltaje aumenta el voltaje de entrada al sistema con relación a un número de estados, cada estado es conformado por un arreglo de diodos y capacitores que permiten obtener un voltaje

de CD. El sistema de cosecha cuenta con un dispositivo que almacena la energía rectificadora proveniente del multiplicador. En un sistema de cosecha de energía en RF, los componentes clave son la antena, que recoge la energía RF y el rectificador/multiplicador de voltaje. La eficiencia de un sistema para cosecha de energía depende de: eficiencia de la antena, la adaptación de impedancia entre la antena y el circuito multiplicador de voltaje, la eficiencia del circuito conversor de RF a corriente continua [Srinivasu, 2019]. Un rectificador debe producir un voltaje de salida de CD con un mínimo de armónicos [Rashid, 2004]. Adicionalmente, la eficiencia del cosechador de energía también depende de la selección de los diodos implementados en el circuito multiplicador, así como el número de estados.

Antena

Una antena es un sistema conductor metálico capaz de radiar y capturar ondas electromagnéticas [Tomasi, 2003]. Existen tres parámetros que caracterizan el funcionamiento de la antena: la ganancia, la frecuencia de resonancia y el ancho de banda. En un sistema para cosecha de energía es preferible una antena con ganancia alta [Tran, 2017]. La potencia recibida por una antena está dada por la ecuación 1.

$$Pr = Pt * Gt * Gr * \left(\frac{c}{4\pi rf}\right)^2 \quad (1)$$

Donde:

- Pr : potencia recibida en dBm
- Gt : ganancia de la antena
- Pt : potencia transmitida
- Gr : ganancia de la antena de recepción
- c : velocidad de la luz
- f : frecuencia de funcionamiento
- r : distancia entre el transmisor y la antena de recepción.

Las antenas funcionan a una frecuencia de operación determinada llamada frecuencia de resonancia. Esta frecuencia está determinada por la inductancia y

capacitancia de la antena. Conforme la frecuencia aumenta, la inductancia se vuelve dominante y la capacitancia disminuye. La frecuencia en la que la inductancia y la capacitancia se anulan se llama frecuencia de resonancia [Tran, 2017].

El ancho de banda de la antena es el rango de frecuencias en la que la antena puede operar. Una antena con ancho de banda amplio recolecta señales de un rango de frecuencia más grande que uno de banda ancha más estrecho, sin embargo, este es más susceptible al ruido [Tran, 2017].

Los parámetros S describen la relación entrada-salida entre los puertos o terminales en un sistema eléctrico. El parámetro S_{11} representa cuánta potencia es reflejada por la antena, también conocido como coeficiente de reflexión o pérdida por retorno. La pérdida por retorno en términos de potencia es ecuación 2;

$$P_{ret} = 10 * \log \left(\frac{P_{inc}}{P_{ref}} \right) \quad (2)$$

Donde:

- P_{inc} : potencia incidente.
- P_{ref} : potencia reflejada.

Adaptador de impedancias

En un sistema de cosecha de energía la impedancia de la antena receptora y la impedancia de salida del circuito receptor deben ser idénticos, si esto no es así parte de la energía recolectada es reflejada nuevamente al ambiente [Luo, 2019]. Las fugas de energía durante la transmisión en sistemas eléctricos de baja potencia pueden causar insuficiencia de energía. Debido a esto agregar una red de adaptación de impedancia asegura que la potencia máxima se transfiera entre la fuente de RF y la carga [Tran, 2017] como se muestra en la figura 2.

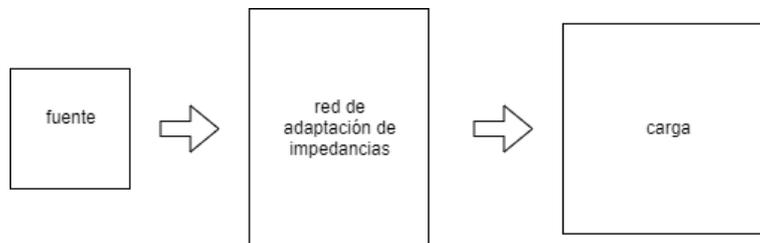


Figura 2 Integración de un adaptador de impedancias.

En los sistemas de recolección de energía la antena receptora se considera como la fuente, mientras que el rectificador/multiplicador de voltaje se considera como la carga como se muestra en la figura 3. Un desajuste de impedancias entre la fuente y la carga crea un flujo de energía reflejado en el circuito que reduce la eficiencia del sistema. La red de adaptación de energía asegura que las impedancias sean idénticas al agregar componentes reactivos y/o capacitivos en el medio [Tran, 2017].

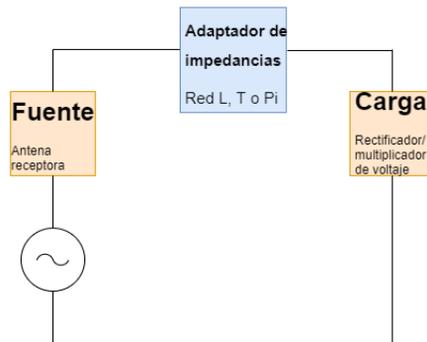


Figura 3 Sistema para cosecha de energía con fuente y carga.

Existen diferentes configuraciones para un circuito adaptador de impedancias. La red L invertida, red T y red π [Tran, 2017]. La configuración L es la más sencilla de diseñar y no altera el factor de calidad del circuito, debido a esto es la configuración más utilizada en un sistema para recolección de energía [Tran, 2017]. Las configuraciones T y π son de diseño más complejo y al ser implementadas alteran el factor de calidad del circuito [Tran, 2017]. La impedancia de un multiplicador de voltaje es variable y depende directamente de la potencia recibida por la fuente, el número de estados y las características de los elementos implementados [Selim, 2019].

Multiplicador de voltaje

El multiplicador de voltaje es una clase de rectificador que convierte el voltaje de corriente alterna (CA) a voltaje de CD y que aumenta el voltaje rectificado ya que este puede ser inadecuado para las aplicaciones [Tran, 2017]. El multiplicador de voltaje y el rectificador suelen ser implementados de manera conjunta en serie y con diferentes estados [Luo, 2019]. El voltaje amplificado es directamente proporcional

al número de estados en el multiplicador de voltaje, sin embargo, un número alto de estados implica más componentes entre capacitores e inductores que podrían causar pérdidas debido a los efectos parásitos de cada componente [Tran, 2017] [Nintanavongsa, 2012]. Existen diferentes topologías para un multiplicador de voltaje: Cockcroft-Walton, Dickson, Dickson Charge Pump, Greinacher [Tran, 2017]. La elección de topología se basa en las necesidades de cada aplicación. También se debe tomar en cuenta la resistencia de carga, la frecuencia de entrada y la potencia de entrada [Sarı, 2019].

Multiplicador de voltaje Cockcroft-Walton

El multiplicador de voltaje Cockcroft-Walton (CW) convierte voltajes bajos en voltajes altos, cada etapa del multiplicador está compuesta por dos capacitores y dos diodos. El multiplicador funciona como un duplicador de voltaje en cada etapa del circuito. En la figura 4 se puede observar el circuito de un multiplicador de voltaje CW con cuatro capacitores y cuatro diodos. El número de estados del multiplicador está dado por la rama de los capacitores C2 y C4 [Nikhil, 2015].

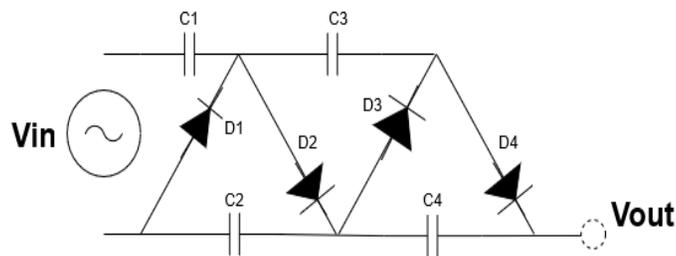


Figura 4 Multiplicador de voltaje Cockcroft-Walton.

Para el multiplicador de voltaje CW durante el primer semiciclo negativo el capacitor C1 se carga a el voltaje pico V_{in} a través del diodo D1. Para el semiciclo positivo el capacitor C2 se carga a $2V_{in}$ a través del diodo D2. Para el siguiente pico negativo el capacitor C3 se carga a $3V_{in}$ a través del diodo D3. Para el siguiente semiciclo positivo el capacitor C4 se carga a $4V_{in}$ a través del diodo D4 [Rashid, 1999]. El voltaje de salida de un multiplicador CW está definido por [Akter, 2014], ecuación 3.

$$V_{dc} = \frac{nV_o}{nR_o + R_L} \quad (3)$$

Donde:

- V_o : voltaje de salida sin carga de una sola etapa.
- R_o : la resistencia del circuito de una sola etapa.
- n : número de estados.

Multiplicador de voltaje Dickson

El multiplicador de voltaje Dickson y el multiplicador de voltaje CW no presentan grandes diferencias en su funcionamiento, sin embargo, la topología de capacitores en paralelo facilita los cálculos y es más sencillo la adaptación de impedancias [Mishra, 2015]; [Sari, 2019]. De esta manera durante el primer semiciclo negativo el capacitor C1 se carga con el voltaje pico de entrada V_{in} a través del diodo D1. Durante el semiciclo positivo siguiente el capacitor C2 se carga a través del diodo D2 con la suma del voltaje cargado en C1 y V_{in} . Durante el semiciclo negativo siguiente el capacitor C3 se carga con la suma de los voltajes de C1 y C2 y V_{in} a través del diodo D3. Para el siguiente semiciclo positivo el capacitor C4 se carga con el voltaje en C3 y el voltaje de entrada V_{in} a través del diodo D4. El multiplicador de voltaje Dickson se muestra en la figura 5 [Sari, 2019]. El voltaje de salida del multiplicador Dickson está dado por la ecuación 4.

$$V_{dc} = 2 * N * (V_{in} - V_t) \quad (4)$$

Donde:

- N : número de estados.
- V_{in} : voltaje pico de entrada.
- V_t : voltaje de conducción de los diodos.

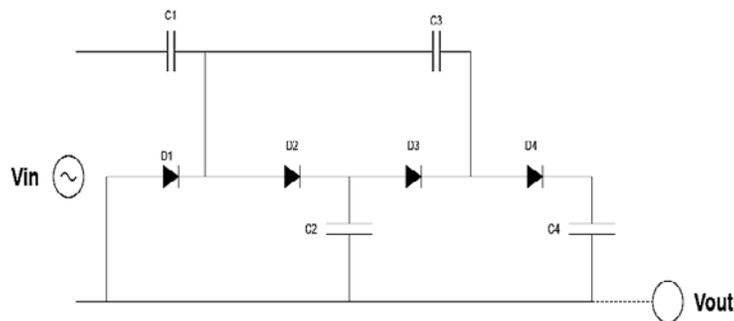


Figura 5 Multiplicador de voltaje Dickson.

Potencia de salida. La potencia de salida del multiplicador de voltaje está dada por la ecuación 5.

$$P_{out} = \frac{V_{dc}^2}{R_{carga}} \quad (5)$$

Donde:

- V_{dc} : voltaje de salida de corriente directa
- R_{carga} : valor de la resistencia de carga.

Eficiencia. La eficiencia de salida está dada por la ecuación 6.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_r} \quad (6)$$

Donde:

- P_{out} : potencia de salida.
- P_r : potencia recibida.

Selección de los componentes

La eficiencia de un sistema de cosecha de energía depende de la eficiencia de cada bloque de este. Debido de la interacción compleja entre los bloques, el diseño del sistema debe ser considerado en conjunto [Mohammed, 2019]. Los componentes determinan la frecuencia de operación y la eficiencia en la conversión de energía. Los capacitores y los diodos deben ser basados en la corriente de carga esperada y el voltaje de salida esperado:

- **Selección de los capacitores.** El capacitor debe soportar al menos el doble del voltaje máximo esperado.
- **Selección de los diodos.** En el multiplicador de voltaje los diodos actúan como interruptores. Los diodos deben tener un tiempo de conmutación rápido para trabajar a altas frecuencias y el voltaje de umbral bajo. Las características principales con las que tienen que cumplir los diodos son: Voltaje de activación muy bajo, tiempo de conmutación muy bajo, corriente de saturación alta, baja capacitancia de unión, baja resistencia en serie equivalente [Nintanavongsa, 2012]

3. Resultados

Para realizar las simulaciones se utilizó el simulador Advanced Design System (ADS). Se simularon las topologías especificadas para dos, tres y siete estados, cada circuito se formó con capacitores de 100 pF y se utilizaron diodos de alta frecuencia schottky HSMS-2852, pertenecientes al paquete HFDiode de ADS. Debido a la no linealidad del circuito producida por los diodos, se utilizó el control de simulación Harmonic Balance que es un análisis en el dominio de la frecuencia útil para circuitos de RF y microondas. El circuito de cada simulación se alimentó por una fuente que produce una potencia de entrada que va desde -20 dBm hasta 20 dBm, con 50Ω de impedancia a una frecuencia de 950 MHz. Cada multiplicador se conectó a una resistencia de carga de 1,000, 10,000 y 100,000 Ω y a un capacitor que disminuye el voltaje de rizo (voltaje AC) presente en la señal de CD. En la figura 6 y figura 7, se puede observar los circuitos implementados en ADS para los multiplicadores CW y Dickson de dos estados, respectivamente.

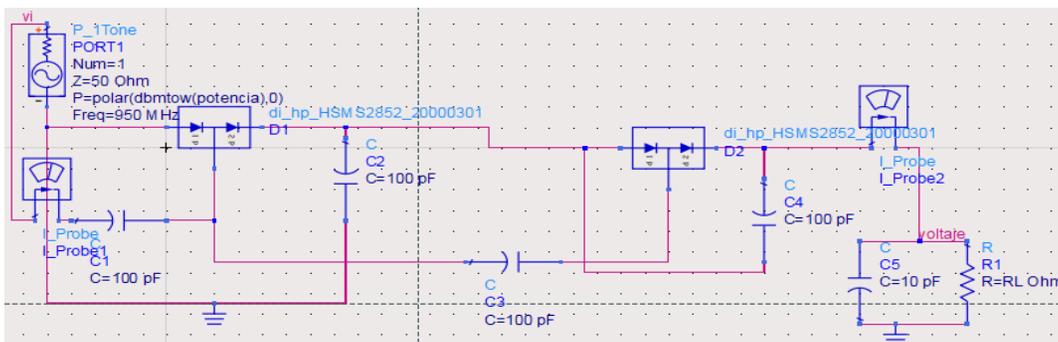


Figura 6 Multiplicador CW de dos estados implementado en ADS.

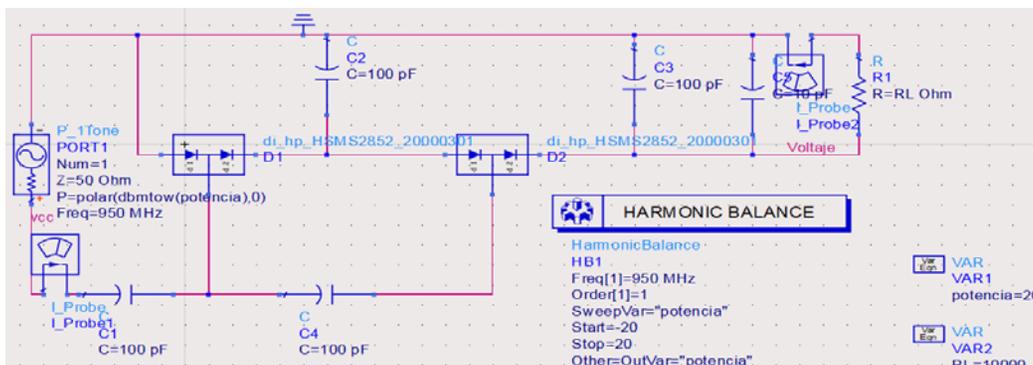


Figura 7 Multiplicador Dickson de dos estados implementado en ADS.

En la figura 8 se puede observar el voltaje obtenido a la salida del multiplicador CW de dos estados a través de una resistencia de carga de 10,000 Ω . De la misma forma, en la figura 9 se observa el voltaje de salida de un multiplicador Dickson de dos estados a través de una resistencia de 10,000 Ω .

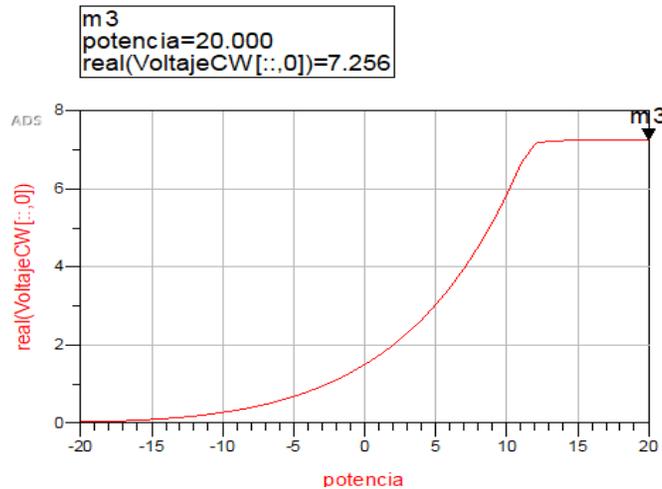


Figura 8 Salida de voltaje del multiplicador CW de dos estados.

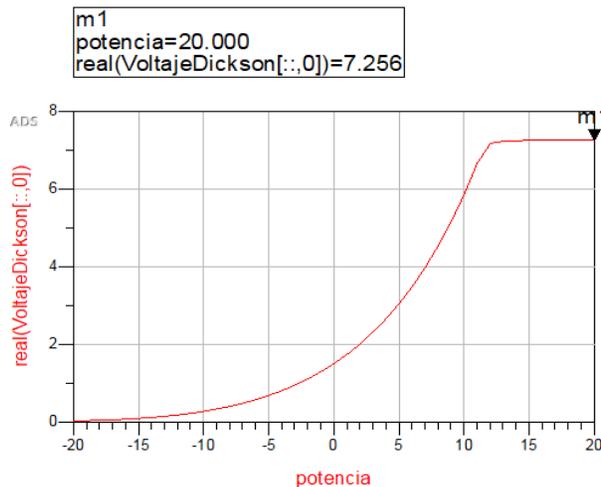


Figura 9 Salida de voltaje del multiplicador Dickson de dos estados.

En la figura 10 y en la figura 11, se observa la implementación de los multiplicadores CW y Dickson para tres estados respectivamente. En la figura 12 y en la figura 13, se observa el voltaje de salida para los multiplicadores a través de una resistencia de carga de 10,000 Ω .

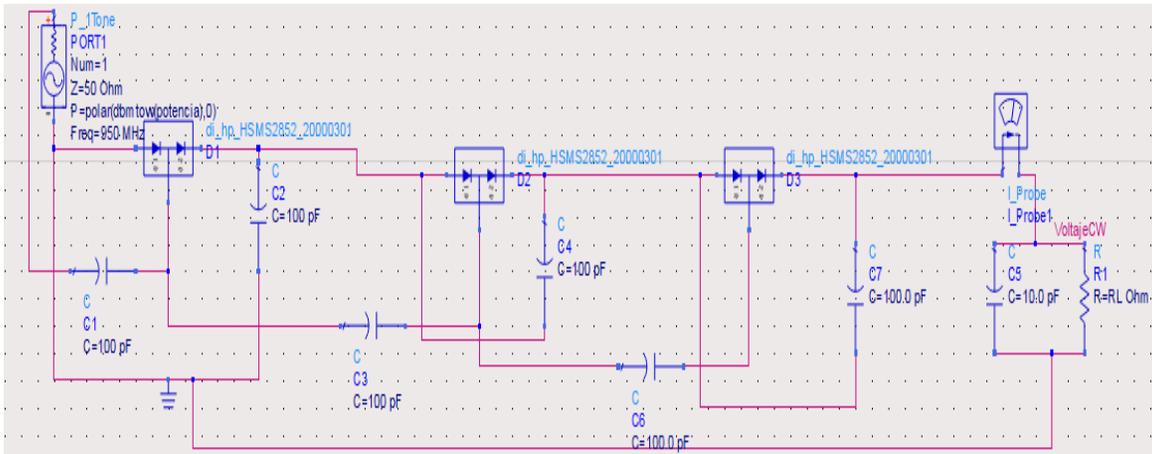


Figura 10 Multiplicador CW de tres estados implementado en ADS.

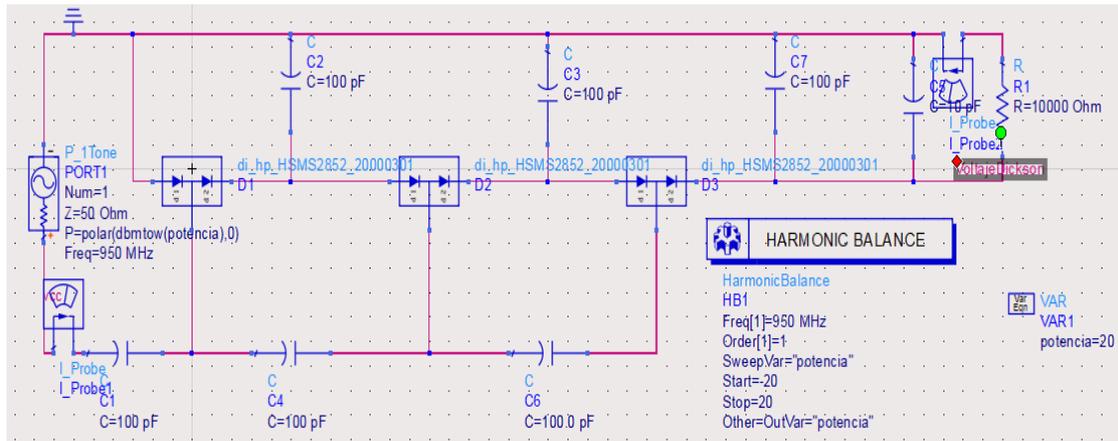


Figura 11 Multiplicador Dickson de tres estados implementado en ADS.

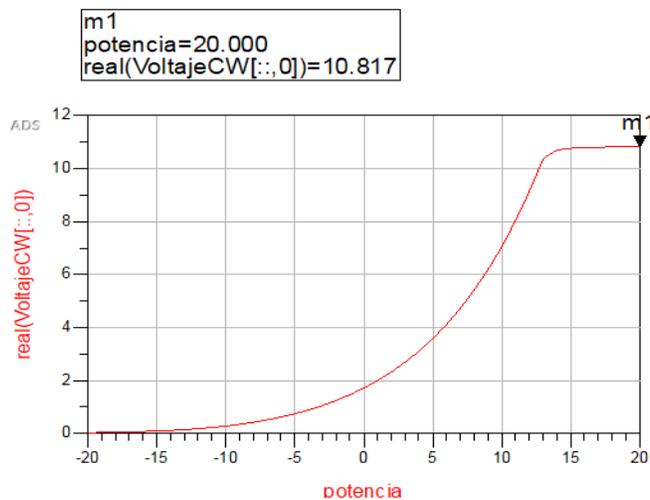


Figura 12 Salida de voltaje de un multiplicador CW de tres estados.

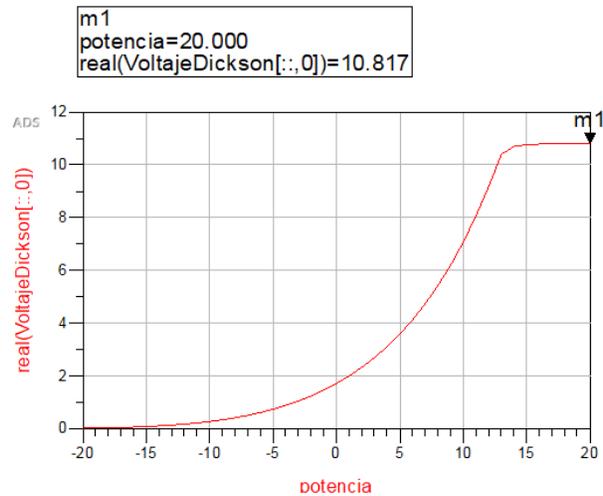


Figura 13 Salida de voltaje de un multiplicador Dickson de tres estados.

En la figura 14 y en la figura 15, se observa la implementación de los multiplicadores CW y Dickson para siete estados respectivamente. En la figura 16 y en la figura 17, se observa el voltaje de salida para los multiplicadores a través de una resistencia de carga de 10,000 Ω .

En la tabla 1 se puede observar el voltaje de salida correspondiente a una potencia de entrada de 20 dBm en un multiplicador CW. En la tabla 2 se puede observar el voltaje de salida de un multiplicador Dickson con una potencia de entrada de 20 dBm en un multiplicador Dickson. En la tabla 3 se observa la eficiencia a la salida de un multiplicador Dickson con respecto a la potencia de entrada para una resistencia de 10,000 Ω .

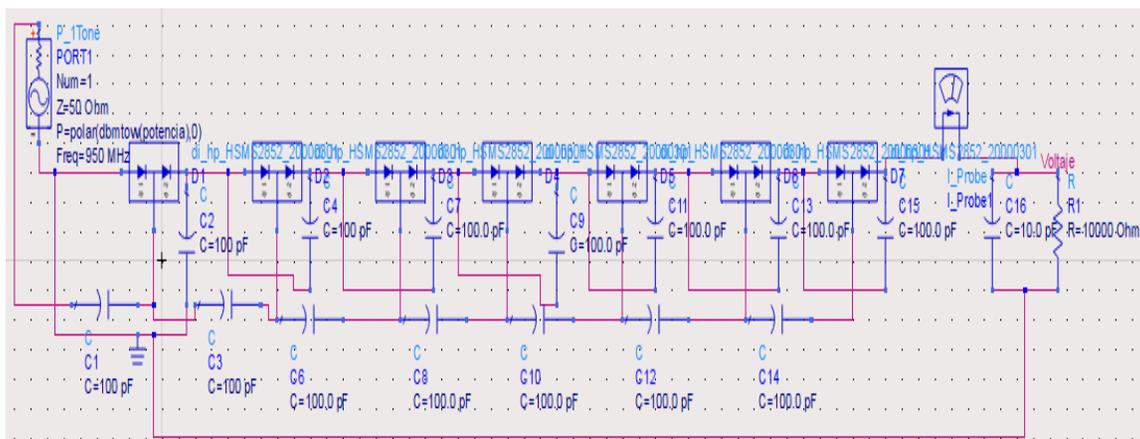


Figura 14 Multiplicador CW de siete estados implementado en ADS.

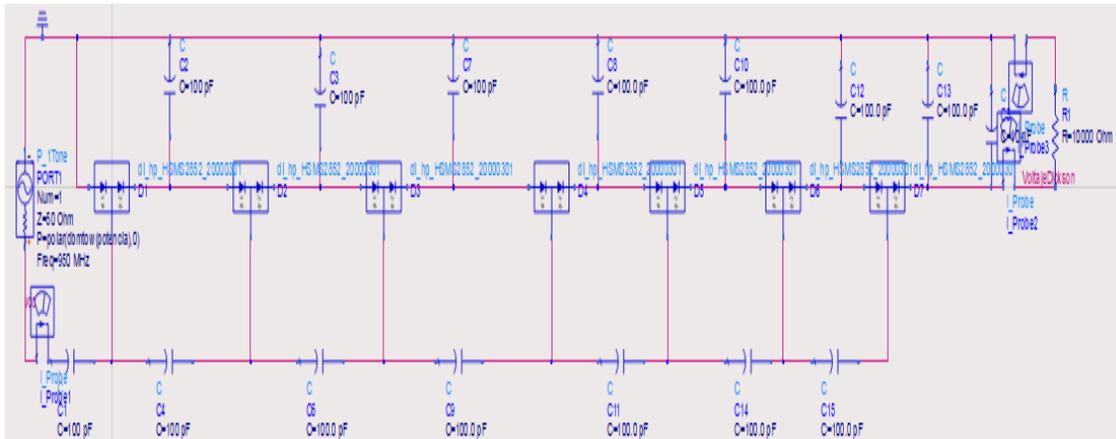


Figura 15 Multiplicador Dickson de siete estados implementado en ADS.

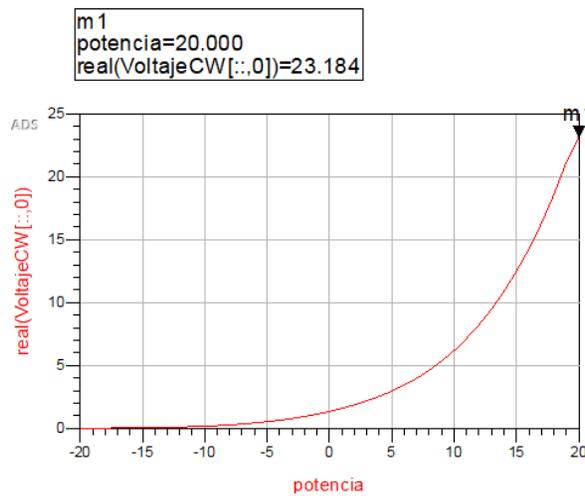


Figura 16 Salida de voltaje del multiplicador CW de siete estados.

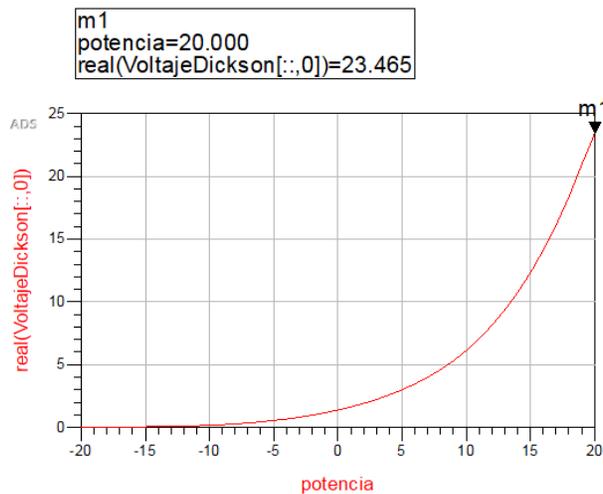


Figura 17 Salida de voltaje del multiplicador Dickson de siete estados.

Tabla 1 Salida de voltaje de un multiplicador CW con respecto a la resistencia.

Resistencia (Ω)	Voltaje de salida en dos estados (Volts)	Voltaje de salida en tres estados (Volts)	Voltaje de salida en siete estados (Volts)
1,000	6.585	7.042	3.929
10,000	7.256	10.817	23.184
100,000	7.328	10.987	25.551

Tabla 2 Salida de voltaje de un multiplicador Dickson con respecto a la resistencia.

Resistencia (Ω)	Voltaje de salida en dos estados (Volts)	Voltaje de salida en tres estados (Volts)	Voltaje de salida en siete estados (Volts)
1,000	6.585	7.026	3.820
10,000	7.256	10.817	23.465
100,000	7.328	10.987	25.558

Tabla 3 Eficiencia de salida en un multiplicador Dickson.

Potencia de entrada (dBm)	Eficiencia de salida Dos estados (%)	Eficiencia de salida Tres estados (%)	Eficiencia de salida Siete estados (%)
-20	0.841	0.729	0.225
-10	7.5625	7.9	3.13
0	22.86	30	19.37
10	34.49	50	38.16
20	5	11.70	54.7

En la tabla 4 se observa la eficiencia a la salida de un multiplicador CW con respecto a la potencia de entrada para una resistencia de 10,000 Ω .

Tabla 4 Eficiencia de salida en un multiplicador CW.

Potencia de entrada (dBm)	Eficiencia de salida Dos estados (%)	Eficiencia de salida Tres estados (%)	Eficiencia de salida Siete estados (%)
-20	0.84	0.72	0.21
-10	7.554	7.84	2.862
0	22.77	29.79	18.36
10	34.3	50	38.9
20	5.264	11.7	46

4. Discusión

Con base en los resultados obtenidos, el voltaje de salida de ambos multiplicadores muestra una relación de aumento con respecto al número de estados simulados. Sin embargo, el crecimiento no es proporcional debido a las

características no lineales de los circuitos. El voltaje de salida con respecto a el valor de la resistencia aumenta considerablemente con respecto al valor anterior. Sin embargo, esto no garantiza que el valor de la eficiencia del multiplicador sea mayor. Ambos multiplicadores de voltaje muestran un voltaje de salida mayor para sus respectivas topologías de siete estados y una resistencia de carga de $100,000\Omega$ (tabla 1 y tabla 2). Como se observa en las tablas 3 y 4 la eficiencia de los multiplicadores para una resistencia de $10,000\Omega$ es mayor en la potencia de entrada de 10 dBm para los multiplicadores Dickson y CW de dos y tres estados. Sin embargo, la eficiencia de los multiplicadores de siete estados es mayor para una potencia de entrada de 20 dBm (tabla 3 y tabla 4).

Los resultados anteriores se consideran sin la previa adaptación entre la impedancia de la antena (fuente) y la carga (multiplicador de voltaje). De considerar lo anterior se lograría la máxima transferencia de potencia entre ambos bloques. El análisis realizado puede funcionar para elegir la topología más efectiva para llevar a cabo una futura implementación física en el laboratorio, considerando los dispositivos ya mencionados como los diodos de alta frecuencia HSMS-2852.

5. Conclusiones

En este trabajo se analizaron las topologías de los multiplicadores de voltaje Dickson y Cockcroft-Walton en sistemas para cosecha de energía. El análisis se realizó para multiplicadores con diferentes números de estados y valores de resistencias. En el análisis realizado se observó que ambos multiplicadores muestran un voltaje de salida similar considerando las mismas características de diseño. Estos resultados mostraron que el multiplicador Dickson obtiene un mayor voltaje de salida y una mayor eficiencia para su topología de siete estados con una resistencia de carga de $10,000\Omega$ a una potencia de entrada de 20 dBm. Sin embargo, para los multiplicadores Dickson y CW de dos y tres estados se mostró una mayor eficiencia en una potencia de entrada de 10 dBm. Los resultados obtenidos mostraron que la respuesta de cada una de las topologías del estudio, están relacionadas con la potencia recibida por la antena y con la variación de impedancias en los multiplicadores de voltaje que genera esta misma potencia. Para

ambas topologías el voltaje de salida no muestra una tendencia lineal, por lo cual se sugiere que el diseño se realice en base a las características específicas de la antena a utilizar para la cosecha de energía.

Es importante mencionar que la eficiencia de todo el sistema para cosecha de energía dependerá de las características de potencia recibida por la antena, la potencia transmitida desde la antena hasta el multiplicador y de la eficiencia de conversión del multiplicador de voltaje. Por lo cual, se sugiere ampliamente la inclusión de un adaptador de impedancias que mejore la transmisión de potencia entre la antena y el multiplicador de voltaje.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Akter, N., Hossain, B., Kabir, M., Bhuiyan, A., Yeasmin, M., Sultana, S. Design and Performance Analysis of 10-Stage Voltage Doublers RF Energy Harvesting Circuit for Wireless Sensor Network. *Journal of Communications Engineering and Networks*. 2. 84-91, 2014.
- [2] Keysight Technologies, ADS (2017). Product Release, <https://www.keysight.com/en/pd-2854156/ads-2017>.
- [3] Luo, Yu., Pu, L., Wang, G., Zhao, Y. RF Energy Harvesting Wireless Communications: RF Environment, Device Hardware and Practical Issues. *Sensors*, 2019.
- [4] Mishra, D., De, S., Jana, S., Basagni, S., Chowdhury, K., Heinzelman, W. Smart RF Energy Harvesting Communications: Challenges and Opportunities. *Communications Magazine*, IEEE. 53. 70-78, 2015.
- [5] Mohammed Al-Azawy, M., Sari, F. Analysis of Dickson Voltage Multiplier for RF Energy Harvesting, 2019.
- [6] Nikhil, M., High Voltage Generation by using Cockcroft-Walton Multiplier, 2015.
- [7] Nintanavongsa, P., Muncuk, U., Lewis, D., Chowdhury, K. Design Optimization and Implementation for RF Energy Harvesting Circuits. *Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, IEEE Journal on. 2. 24-33, 2012.

- [8] Rashid, M.H. Circuitos microelectrónicos análisis y diseño. 1a ed. International Thomson, 2000.
- [9] Rashid, M.H. Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones 3a ed. PrenticeHall, 2004.
- [10] Sarı, F., Uzun, Y. A comparative study: voltage multipliers for RF energy harvesting system. 61. 12-23, 2019.
- [11] Selim, K., Wu, S., Saleeb. RF Energy Scavenging with a Wide-range Input Power Level. IEEE Access. 2019.
- [12] Srinivasu, G., Sharma, V., Anveshkumar, N. A Survey on Conceptualization of RF Energy Harvesting. JASC: Journal of Applied Science and Computations, Vol. VI, Issue: II, pp. 791-800, 2019.
- [13] Tran, L., Cha, H., Park, W. RF Power Harvesting: a review on designing methodologies and applications. Micro and Nano Systems Letters, 5:14, 2017.