

FUENTE DE ALIMENTACIÓN CONMUTADA CON ELEVADA RELACIÓN ENTRADA-SALIDA DE VOLTAJE

SWITCHED POWER SUPPLY WITH HIGH INPUT-OUTPUT VOLTAGE RATIO

Luis Alejandro Flores Oropeza

Universidad Autónoma de Aguascalientes, México
alejandro.floreso@edu.uaa.mx

Alejandro Román Loera

Universidad Autónoma de Aguascalientes, México
aroman@correo.uaa.mx

Daniela Maribel Trancoso Cervantes

Universidad Autónoma de Aguascalientes, México
al188048@edu.uaa.mx

Recepción: 13/enero/2022

Aceptación: 25/febrero/2022

Resumen

Se propone una fuente de alimentación con elevada ganancia entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida para aplicaciones que necesitan ser alimentadas desde 12 a 14 V y en las que sea necesario contar con aislamiento galvánico. Fuentes de alimentación de estas características encuentran particulares retos de diseño, ya que dependiendo del tipo de aplicación para el que se utilicen, deberán proporcionar alto voltaje de salida, que sea simétrico o con pulsos de salida de muy corta duración. En este artículo se diseña, simula, construye y prueba una fuente con potencia de 10 W que alcanza voltajes desde 0 a 1,000 V a partir de voltajes de 12 a 14 V logrando una elevada ganancia entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida (83). Estos niveles de voltaje de salida encuentran utilidad en aplicaciones de alto voltaje como en actuadores ultrasónicos.

Palabras Clave: Alto voltaje, fuente de alimentación conmutada, ultrasónico.

Abstract

A power supply with a high gain between the input and the output voltage is proposed for applications that need to be supplied from 12 to 14 V and in which it is

necessary to have galvanic isolation. Power supplies of these characteristics encounter design challenges, since depending on the type of application for which they are used, they must provide high output voltage, which is symmetrical or with very short output pulses. This article designs, simulates, builds, and tests a 10 W power supply that reaches voltages of 0 to 1,000 V from voltages of 12 to 14 V achieving a high relationship between input and output voltage (83). These output voltage levels find utility in high voltage applications such as ultrasonic actuators.

Keywords: *High voltage, switched power supply, ultrasonic.*

1. Introducción

Múltiples artículos se han presentado para describir aplicaciones con altos voltajes de salida y en los que se utilizan fuentes de alimentación conmutadas para aplicaciones de sensores o actuadores ultrasónicos. En el estado de la técnica, existe información de aplicaciones ultrasónicas en las que se centran en el diseño de la fuente de alimentación, otras en los sensores, otras en el control y otras directamente en las aplicaciones. Por ejemplo, en [Xiao, 2013] se presenta el diseño de una fuente de alimentación CC / CC con una entrada de 12 V y una salida de 300 y – 300 V independientemente, así como un generador PWM configurado por una FPGA. En [Jeong, 2015] se propone un sistema de control por transductor ultrasónico y un algoritmo de control digital simple para caracterizar la aleación de aluminio. El sistema de control del transductor de ultrasonido se implementa para verificar el algoritmo de control digital que se propone. El algoritmo de control digital propuesto se aplica a un prototipo de transductor ultrasónico de 3 kW. En [Tseng, 2004] se explora un convertidor cuasi-resonante de conmutación suave para aplicaciones de administración transdérmica de fármacos con los procesos de electroporación y fonoforesis. El convertidor puede generar una salida de voltaje de CC constante para un generador pulsado en el procesamiento de la electroporación y puede generar un voltaje de CC variable para impulsar un dispositivo piezoeléctrico tipo radial en modo de vibración axial para el procesamiento de la fonoforesis. En [Chebli, 2005] se trata sobre el diseño y la implementación de un convertidor elevador CC-CC basado en tecnología CMOS de alto voltaje

programable totalmente integrado, seguido de una etapa de doblador de alto voltaje con salida negativa, que está dedicado a los transmisores ultrasónicos. La topología propuesta se basa en un circuito de bomba de carga de 5 etapas, y en cada etapa se utiliza un cambiador de nivel como generador de reloj para aumentar exponencialmente el voltaje de CC. Sin embargo, y a pesar de que se habla de alto voltaje, solo alcanzan valores de 100 V que se quedan muy por debajo de lo que se presenta en este artículo. En [Xu, 2005] se presenta el diseño de una fuente de alimentación para un motor ultrasónico rotativo de conversión, de modo que tiene aplicaciones potenciales en robótica de miniatura. Los autores mencionan que el circuito de accionamiento eléctrico presenta algunos desafíos únicos, particularmente en la producción de una señal de alta frecuencia (~ 40 kHz), alta tensión (~ 200 V pico a pico) en un motor capacitivo de baja impedancia (~ 100 Ω), mientras se logra una alta eficiencia. La fuente de alimentación al igual que la que se presenta en este artículo, debe alimentarse de un bajo voltaje de entrada, particularmente en este caso de una batería de 12 V. En [Qiu, 2012] se presenta un control basado en FPGA que logra características variables de los pulsos, como la temporización, la forma de onda y la frecuencia. El hardware se implementa en un esquema compacto, basado en una placa de circuito impreso y un control totalmente digital. En esta propuesta, los resultados de las pruebas muestran que se puede generar un pulso unipolar que puede alcanzar más de 165 V pico a pico con 70 MHz, y un pulso bipolar y los pulsos arbitrarios pueden alcanzar 150 y 60 V pico a pico con frecuencias centrales de 60 y 120 MHz, respectivamente. Sin embargo, ninguna de las aportaciones encontradas en la bibliografía satisface las condiciones de voltaje que se buscan alcanzar en este artículo, ya que la topología de fuente de alimentación que se presenta alcanza voltajes de salida de CC desde 500 y hasta 1,000 V pico a pico a partir de un voltaje de entrada de 12 a 14 V.

La topología de fuentes de alimentación que se propone para alcanzar estos niveles de voltaje está basada en el convertidor doblador de corriente funcionando como convertidor elevador con devanados auxiliares propuesto en [Flores, 2007] pero para un valor de voltaje de salida inferior al que se pretende diseñar y construir en este artículo.

2. Métodos

Topología propuesta y forma de funcionamiento

En la figura 1, se muestra la topología de fuente de alimentación que se propone para conseguir una elevada ganancia entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida. Esta topología está integrada por un transformador principal (TR), dos inductores (L_1 y L_2) con devanados auxiliares que también pueden funcionar como transformadores ($TF1$ y $TF2$), dos interruptores ($M1$ y $M2$), cuatro diodos rectificadores ($D1-D4$), dos diodos para los devanados auxiliares (D_{F1} y D_{F2}) el capacitor de entrada (C_B) y capacitor de salida (C_C).

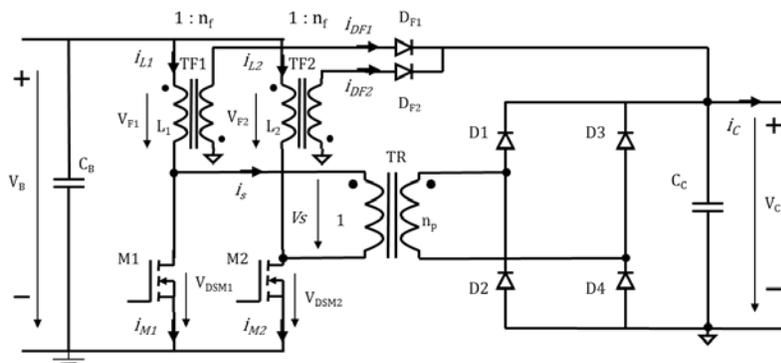


Figura 1 Topología de fuente de alimentación propuesta.

A partir del valor del ciclo de trabajo d , la fuente de alimentación trabaja básicamente de dos formas distintas. Una es cuando el ciclo de trabajo se encuentra entre 0 y el 50%, entonces la fuente de alimentación opera como una combinación del Convertidor Elevador y el Convertidor Flyback de forma alternada usando el transformador principal (TR) y los transformadores auxiliares ($TF1$ y $TF2$). En la figura 2, se muestran las formas de onda para este modo de operación en el que el ciclo de trabajo está entre 0 y el 50%. La segunda forma es cuando el ciclo de trabajo es mayor o igual al 50%, entonces la fuente de alimentación opera como un Convertidor Elevador Doblador de Corriente como el que se muestra en la figura 3. Obsérvese en la figura 3 que la topología se ha simplificado ya que con este valor de ciclo de trabajo los devanados auxiliares ($TF1$ y $TF2$) y los diodos auxiliares (D_{F1} y D_{F2}) dejan de operar y por lo tanto es como si no existieran en el circuito.

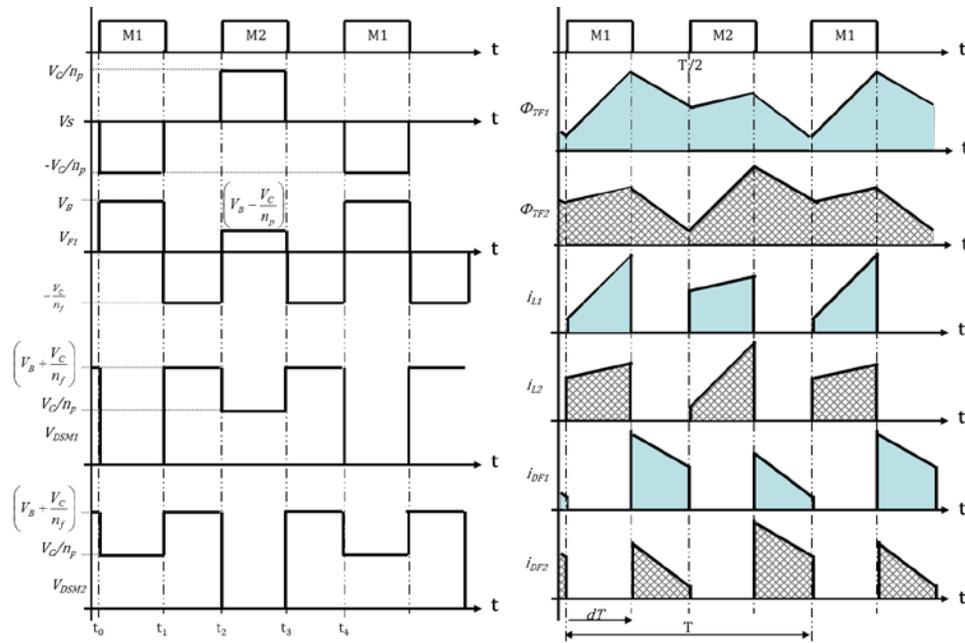


Figura 2 Formas de onda de operación de la topología propuesta para $(0 < d < 0.5)$.

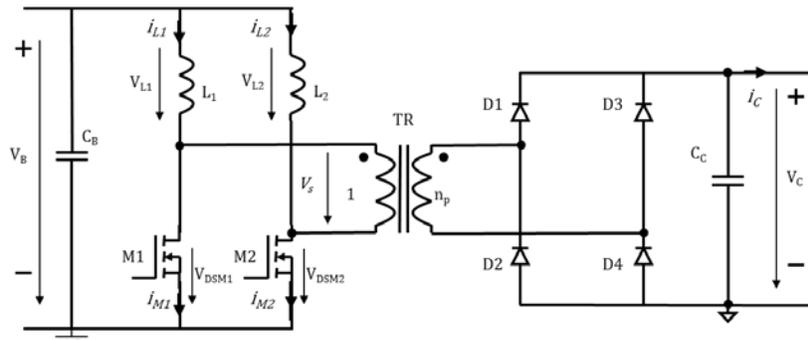


Figura 3 Topología de fuente de alimentación operando con $(d > 0.50)$.

A partir de la figura 2, se pueden identificar cuatro intervalos distintos dentro de un periodo de conmutación T :

- $(t_0 - t_1)$ El interruptor $M1$ se activa y el inductor L_1 almacena energía como un convertidor Flyback mientras que el inductor L_2 entrega energía hacia la salida a través del transformador (TR) como un convertidor elevador.
- $(t_1 - t_2)$ El interruptor $M1$ se desactiva y los inductores L_1 y L_2 entregan energía hacia la salida a través de sus respectivos transformadores auxiliares $TF1$ y $TF2$ ambos como convertidores tipo Flyback.

- $(t_2 - t_3)$ El interruptor $M2$ se activa y el inductor L_2 almacena energía como un convertidor Flyback mientras que el inductor L_1 entrega energía hacia la salida a través del transformador (TR) como un convertidor elevador.
- $(t_3 - t_4)$ El interruptor $M2$ se desactiva y los inductores L_1 y L_2 entregan energía hacia la salida a través de sus respectivos transformadores auxiliares $TF1$ y $TF2$ ambos como convertidores tipo Flyback.

Si se aplica un balance de voltios por segundo a cualquiera de los inductores (L_1 y L_2) de la figura 1 dentro de un periodo de conmutación T y si se considera que la fuente de alimentación opera en modo de conducción continuo (MCC), entonces, se obtiene la ecuación 1 que relaciona el voltaje de salida con el voltaje de entrada y las relaciones de transformación n_p y n_f de los transformadores TR , $TF1$ y $TF2$.

$$V_C = \frac{2V_B d}{\frac{(1-2d)}{n_f} + \frac{d}{n_p}} \quad (1)$$

Donde:

V_C : voltaje de salida.

V_B : voltaje de entrada.

d : ciclo de trabajo ($0 < d < 0.5$).

n_f : relación de transformación para los devanados auxiliares $TF1$ y $TF2$.

n_p : relación de transformación para el transformador principal TR .

A partir de la figura 4, se pueden identificar dos modos de operación para cada inductor (L_1 y L_2) dentro de un periodo de conmutación T .

- (dT) El interruptor $M2$ se activa y el inductor L_2 almacena energía como un convertidor Elevador.
- $(1 - d) T$ El interruptor $M2$ se desactiva y el inductor L_2 entrega energía a la salida como un convertidor Elevador a través del transformador TR .
- Para el inductor L_1 ocurre lo mismo dentro del periodo de conmutación T solo que desfasado 180° en el tiempo cuando se activa y desactiva interruptor $M1$.

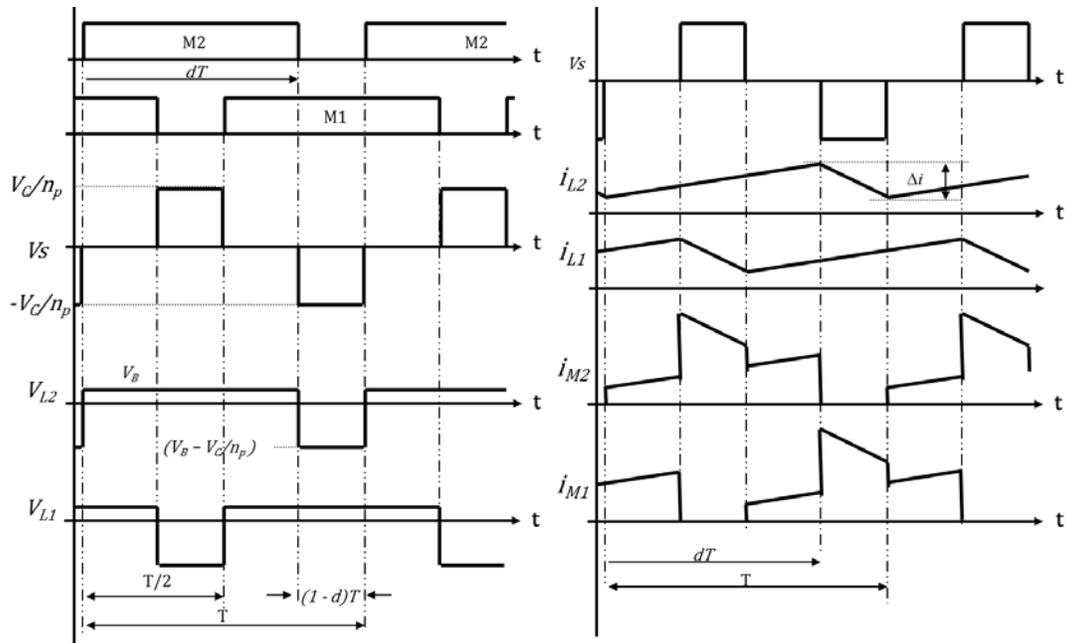


Figura 4 Formas de onda de la topología operando con ($d > 0.5$).

Si se aplica un balance de voltios por segundo a cualquiera de los inductores (L_1 y L_2) de la figura 3 dentro de un periodo de conmutación T y si se considera que la fuente de alimentación opera en modo de conducción continuo (MCC), entonces, se obtiene la ecuación 2 que relaciona el voltaje de salida con el voltaje de entrada y la relación de transformación n_p del transformador TR .

$$V_c = n_p V_B \frac{1}{1-d} \quad (2)$$

Donde:

V_c : voltaje de salida.

V_B : voltaje de entrada.

d : ciclo de trabajo ($d > 0.5$).

n_p : relación de transformación para el transformador principal TR .

A pesar de que la fuente de alimentación funciona de una forma con un ciclo de trabajo d de 0 a 50% y de otra forma para el ciclo de trabajo mayor al 50%, la transición entre una forma y la otra se realiza de forma automática y puede estar alternando entre una y otra si el ciclo de trabajo d aumenta o disminuye del 50%.

Especificaciones de diseño y simulación

Para algunas aplicaciones, como es en el caso de sensores y transductores ultrasónicos, es necesario utilizar valores de voltaje que alcancen niveles de entre 500 y hasta 1,000 V. De igual manera, normalmente los voltajes de alimentación se consideran desde valores comunes que se pueden encontrar en baterías recargables y un valor comercial es el de 12 a 14 V. La potencia seleccionada para implementar la topología y verificar su funcionamiento fue de 10 W considerando que existen sensores y/o actuadores ultrasónicos que están por debajo y por encima de esta potencia. Por esta razón, estos son los niveles de voltaje para los que se diseñó la fuente de alimentación y con los que se diseñaron y seleccionaron todos los componentes que la integraron. La frecuencia de conmutación de los interruptores se fijó en 100 kHz ya que es una frecuencia de operación en la que se pueden conseguir una adecuada relación de tamaño para los componentes magnéticos. Para simular la fuente de alimentación se utilizó LTspice XVII que es un software de licencia de libre uso. Con este software se verificó que los niveles de voltaje se podían alcanzar para distintos valores de voltaje de entrada y distintos valores de carga. En la figura 5, se muestra la topología del convertidor que se simuló para uno de los voltajes de salida.

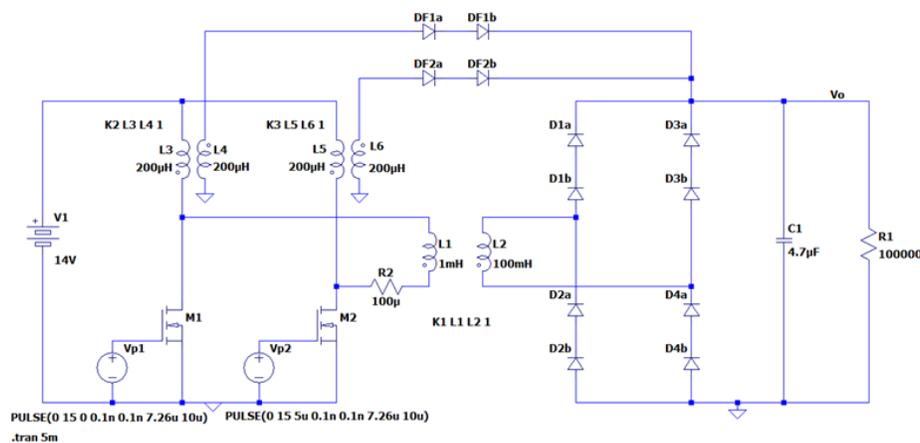


Figura 5 Topología de fuente de alimentación simulada en LTspice.

En la figura 6 y figura 7 se muestran los niveles de voltaje alcanzados para cada una de las simulaciones.

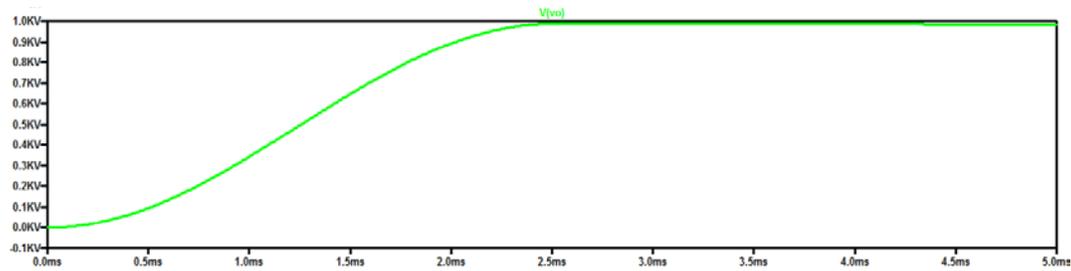


Figura 6 Señal de voltaje de salida que alcanza 1,000 V.

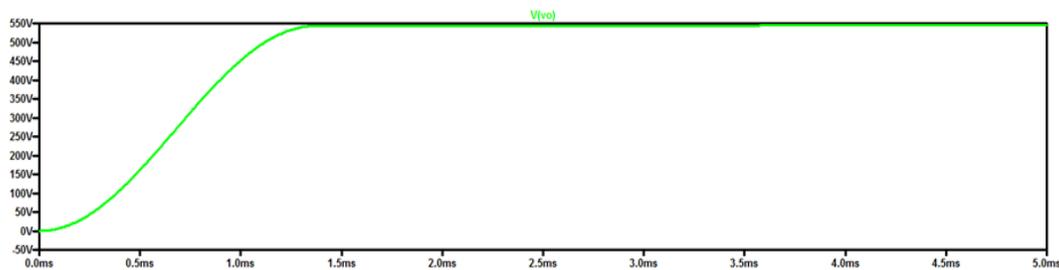


Figura 7 Señal de voltaje de salida que alcanza 550 V.

Elección de semiconductores

Los niveles de voltaje hicieron que para construir la fuente de alimentación fuera necesario conectar componentes en serie como lo fue para los diodos auxiliares (D_{F1} y D_{F2}) así como para los diodos rectificadores ($D1-D4$) en los que se utilizaron diodos NFL09G-U1560 ya que se trata de diodos ultrarrápidos pero que solo alcanzan niveles de bloqueo de 600 V. Para los interruptores se utilizó el MOSFET IRF620 que es un MOSFET que bloquea hasta 200 V y puede conducir una corriente de 5.2 A. Ya que los MOSFETs se encuentran ubicados en el lado primario del transformador principal, estos solo soportan la suma del voltaje de entrada con el voltaje de salida reflejado en el primario a través de la relación de transformación del transformador principal y de los devanados auxiliares siendo 200 V suficientes para su operación.

Diseño de componentes magnéticos

Para el caso de los componentes magnéticos, se diseñaron los inductores (L_1 y L_2) con su respectivo devanado auxiliar para formar los transformadores auxiliares ($TF1$ y $TF2$). Se utilizaron núcleos de ferrita RM6 de material 3C90 con una relación

de 40 vueltas para el primario y 40 vueltas para el secundario obteniendo una relación de transformación 1:1 ($n_f = 1$) empleando alambre magneto del # 28 AWG. Para el caso del transformador TR , también se utilizó núcleo de ferrita RM6 de material 3C90 con una relación de 6 vueltas para el primario con 4 conductores en paralelo de alambre magneto del # 28 AWG y 60 vueltas para el secundario también con alambre magneto del # 28 AWG obteniendo una relación de transformación 1:10 ($n_p = 10$).

Etapa de control

En la figura 8, se muestran los circuitos para generar los dos pulsos de control desfasados 180° y que varían desde 0 hasta casi el 100%. Se utilizaron dos controladores comerciales UC3825N y con arreglos de compuertas lógicas se consiguieron obtener las señales necesarias de control. En la figura 9, se muestran las señales de control para ciclos de trabajo d inferior y superior al 50%.

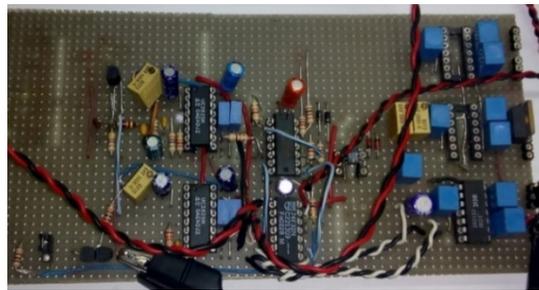
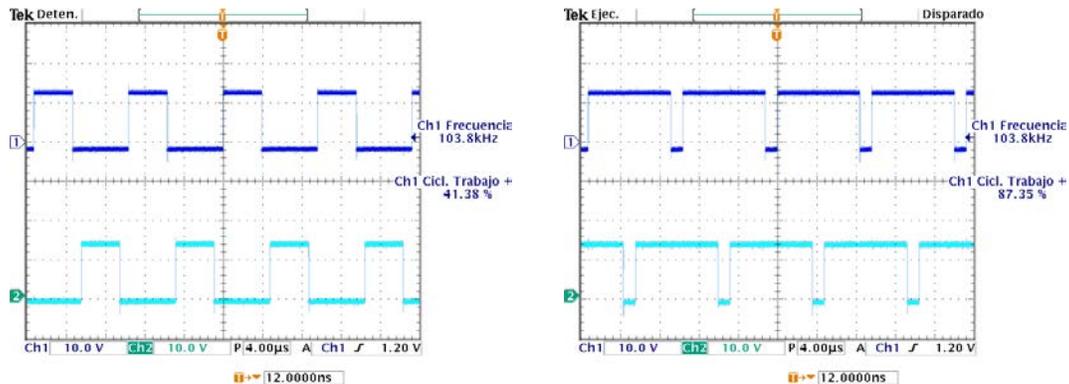


Figura 8 Circuito para generar las señales de control de la fuente de alimentación.



a) Ciclo de trabajo $d = 41.38\%$

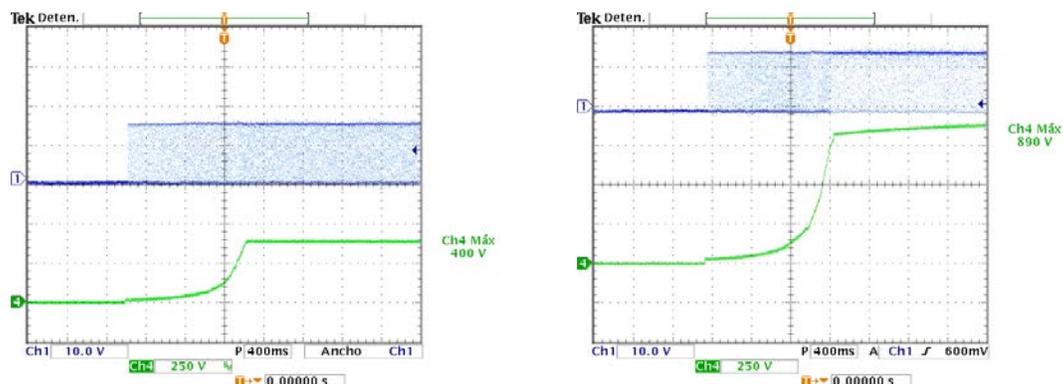
b) Ciclo de trabajo $d = 87.35\%$

Figura 9 Señales de control para la fuente de alimentación a 103.8 kHz.

en los que se aprecia que el voltaje arranca desde 0 V y en la figura 13a el voltaje alcanza un nivel de 580 V mientras que en la figura 13b el voltaje alcanza un nivel de 890 V. En ambos casos, el voltaje de entrada fue de 12 V.



Figura 12 Circuito de control, etapa de potencia y carga.



a) Voltaje de salida de 400 V

b) Voltaje de salida de 890 V

Figura 13 Señales de control (Ch1 10 V/div) y voltaje de salida (Ch4 250 V/div).

4. Discusión

En la figura 13 a) y en la figura 13 b) se muestra el voltaje de salida ajustable en donde se aprecia que alcanza un valor de 400 V (inferior a 500 V) y un valor de 890 V (superior a 500 V). Se puede alcanzar prácticamente cualquier voltaje de salida dependiendo del valor del voltaje de entrada y del ciclo de trabajo d que se tenga para los dos transistores $M1$ y $M2$. Obsérvese que el voltaje de salida aumenta desde 0 V hasta alcanzar el nivel de voltaje que fija tanto el voltaje de entrada como el ciclo de trabajo máximo que se pueda alcanzar. En los voltajes de salida que se muestran en la figura 13a y en figura 13b se aprecia que el voltaje aumenta de manera suave hasta alcanzar el nivel para el cual indican las condiciones del

circuito. En ambas gráficas el ciclo de trabajo aumenta desde 0% hasta el valor máximo que se encuentre preestablecido.

5. Conclusiones

Se ha presentado un análisis del estado de la técnica en la que se documentan distintas propuestas de fuentes de alimentación para aplicaciones de alta ganancia de voltaje de salida y relacionadas con aplicaciones ultrasónicas. Se propone una fuente de alimentación basada en el Convertido Doblador de Corriente para alcanzar altos voltajes de salida utilizando devanados auxiliares en los inductores para conseguir operar desde 0 V en la salida. Se presentan resultados de simulación con los que se verifica que la topología propuesta alcanza los niveles de voltaje requeridos de entre 500 y 1,000 V presentando simulaciones con resultados de 550 y de 1,000 V. Se diseña y construye un prototipo de control para generar las señales de gobierno para los transistores M_1 y M_2 . Se diseñan los componentes magnéticos de alta frecuencia para conseguir que la fuente de alimentación opere en las condiciones ideales de voltajes de salida. Se diseñó y construyó una PCB para colocar lo componentes magnéticos y semiconductores de la fuente de alimentación. Se diseñó y construyó la etapa de potencia de un prototipo de fuente de alimentación para tener voltajes de salida de 500 a 1,000 V presentando valores desde 400 V y hasta 890 V con los que se garantiza que la fuente de alimentación puede trabajar de forma permanente para valores de voltaje inferiores a 500 V. Esto significa que la fuente de alimentación opera de manera estable y sin problemas para ciclos de trabajo d que están por debajo del 50%. Los resultados muestran que es posible construir un prototipo de fuente de alimentación capaz de alcanzar valores de voltaje adecuados para poder alimentar cargas de aplicaciones con elevada ganancia de voltaje como lo es el caso de aplicaciones ultrasónicas.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Chebli, R., Sawan M., and Savaria Y., (2005). A Programmable Positive and Negative High-Voltage Dc-Dc Converter Dedicated for Ultrasonic Applications. 48th Midwest Symposium on Circuits and Systems.

- [2] Flores, L. A., Garcia O., Roman A., Rizo F., and Arambula, L. E., (2007). Isolated Two Inductor Boost Converter Start-up and Steady State Operation with Any Output Voltage. Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA).
- [3] Jeong, D., Kim J., Kim H., and Baek J., (2015). High Power Ultrasonic Transducer with Llcc Resonant Converter Using Digital Control Algorithm. 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM).
- [4] Qiu, W., Yu Y., Tsang F. K., and Sun L., (2012). A Multifunctional, Reconfigurable Pulse Generator for High-Frequency Ultrasound Imaging. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 59, no. 7: 1558-1567. <https://dx.doi.org/10.1109/TUFFFC.2012.2355>.
- [5] Tseng, S., Chen Y., Huang Y., Hsieh H., and Wu T., (2004). Quasiresonant Flyback Converter for Transdermal Drug Delivery Applications. Vol. 3. Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04.
- [6] Xiao, D., Shao J., Ren H., and Xu C., (2013). Design of a High Voltage Pulse Circuit for Exciting Ultrasonic Transducers. 2013 Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology and Application.
- [7] Xu, J., Grant E., Kingon A. I., Wilson J. M., and Franzon P. D., (2005). Drive Circuit for a Mode Conversion Rotary Ultrasonic Motor. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005.