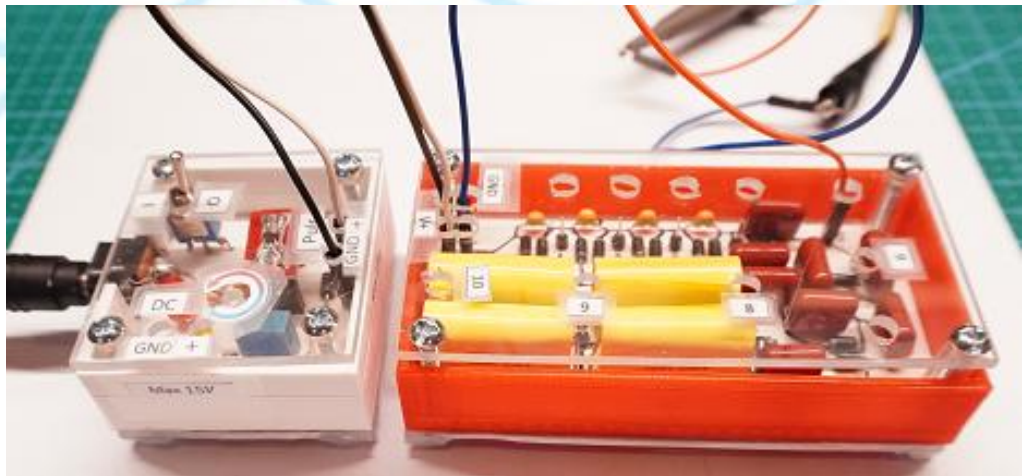


FUENTE DE ALTO VOLTAJE DC AJUSTABLE



Erick Barrios Barocio; Roxette Ramírez Arvidez.
Electrónica (2024)

Existen aparatos que requieren voltajes continuos (DC) de varias decenas de volts, como por ejemplo: estroboscopios, flash de cámaras, láser pulsados o hasta lámparas eléctricas anti-mosquitos. Una fuente adecuada para estas necesidades se puede construir utilizando una combinación de elevadores y multiplicadores de voltaje.

Contenido

1	ELEMENTOS.....	1
1.1	Convertidor Elevador de Voltaje LT1613.....	1
1.2	Multiplicador Cockcroft-Walton.....	4
2	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA FUENTE DE ALTO VOLTAJE	4
2.1	CEV basado en el LT1613.....	5
2.2	MCW de varias etapas.....	6
3	REFERENCIAS.....	8

Una forma relativamente sencilla de generar voltajes DC del orden de decenas de volts se puede implementar con un Convertidor Elevador de Voltaje ^[1] combinado con un Multiplicador Cockcroft-Walton ^[2]. La principal ventaja de este método es que la fuente de voltaje resultante es económica, ligera y pequeña; sin embargo, su desventaja es que proporciona corrientes reducidas ya que esta fuente basa su funcionamiento en el principio de conservación de la potencia para poder generar los voltajes altos.

1 ELEMENTOS

La fuente de alto voltaje consta de dos secciones, la primera es un Convertidor Elevador de Voltaje ajustable y la segunda es un Multiplicador de Cockcroft-Walton, los cuales ya se han abordado en textos anteriores ^[1,2]. Debido a esto, en las siguientes secciones solo se presentarán modificaciones y comentarios sobre dichos elementos.

1.1 CONVERTIDOR ELEVADOR DE VOLTAJE LT1613

El Convertidor Elevador de Voltaje (CEV) es un convertidor DC-DC que eleva el voltaje a cambio de reducir la corriente, conservando la potencia ($P = IV$). Es una fuente conmutada (Figura 1a) que contiene un diodo, un interruptor y dos elementos para almacenar energía (un inductor y un capacitor). La energía que consume el convertidor proviene de una fuente de DC externa.

Para maximizar la eficiencia en el funcionamiento de un CEV, lo más recomendable es sustituir el interruptor mecánico por uno electrónico que sea rápido, lo cual se puede realizar utilizando un transistor (Figura 1b).

Dado que la construcción de estos dispositivos tiene amplias aplicaciones prácticas, en la actualidad existen circuitos integrados diseñados explícitamente para ser utilizados como interruptores en un CEV's y obtener la máxima eficiencia. Uno de dichos integrados es el Convertidor DC/DC LT1613 ^[3], el cual funciona como interruptor de 1.4MHz y puede generar voltajes de salida de hasta 34VDC (Figura 2). La configuración interna de este integrado (Figura 3) consta de

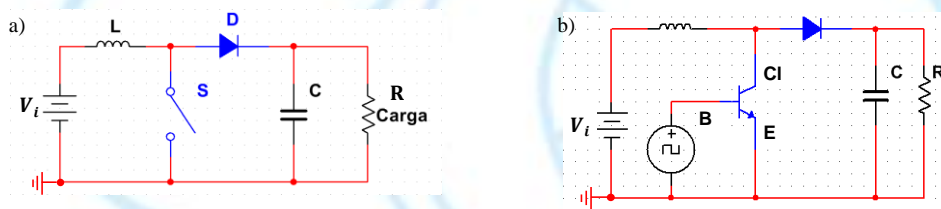


Figura 1. a) Diagrama de circuito de un CEV. El interruptor S se abre y cierra cíclicamente. L : Inductor; C : Capacitor; R : Resistencia de carga; V_i : Voltaje alimentación. b) Circuito CEV utilizando un transistor como interruptor. La señal en la Base del transistor es de frecuencia alta. B – Base; CI – Colector; E – Emisor.

comparadores, transistores y un oscilador. A pesar de verse complejo, es relativamente sencillo entender su funcionamiento.

De forma resumida, el integrado produce una onda cuadrada (similar al temporizador 555 ^[4]), la cual conduce el transistor $Q3$ como si fuera un interruptor entre el pin 1 (SW) y la tierra en el pin 2 (GND). Así, si se conecta un inductor entre el pin 1 y 5, se cargará cuando la corriente fluya por él, y se descargará hacia el capacitor del CEV cuando el transistor está abierto.

El integrado funciona con una fuente de alimentación voltaje de entre 1.1V y 10V (generalmente se usan 5V), conectada al pin 5 (V_{in}). En el diagrama de la Figura 3, este voltaje de alimentación pasa por un sistema de resistencias ($R3$ a $R5$) y dos transistores ($Q1$ y $Q2$) para generar un valor de referencia de 1.23V. Este valor de referencia está conectado a una de las entradas del amplificador $A1$.

La segunda entrada del amplificador $A1$ registrará el voltaje producido por un divisor de voltaje externo ($R1$ y $R2$), el cual se puede modificar mediante la selección de los valores de dichas resistencias y cuyo punto central está conectado al pin 3 (FB).

En esta configuración $A1$ actúa como un restador, es decir, se sustraen los valores de sus entradas generando a la salida un voltaje proporcional a esta diferencia. Por ejemplo, si el voltaje del divisor es menor a 1.23V, $A1$ producirá un voltaje positivo, el cual ingresa a la entrada negativa del comparador $A2$.

Por otro lado, $A2$ compara el voltaje proveniente de $A1$ con la señal recibida en su entrada positiva, la cual es la suma entre la señal oscilante en rampa de 1.4MHz y un voltaje amplificado generado por la corriente que pasa por la resistencia de 0.15Ω del transistor $Q3$. Es de señalar que si la corriente por $Q3$ crece, el voltaje DC sumado a la señal de rampa se incrementará, haciendo que la señal de rampa se desplace hacia arriba. Esto implica que la onda de rampa puede subir o bajar dependiendo de la corriente que circula por el inductor externo.

El propósito del comparador $A2$ es producir una señal cuadrada, ya que que mientras la señal en su entrada negativa sea mayor que la señal triangular de su entrada positiva, generará un voltaje alto, de lo contrario generará un voltaje bajo (Figura 4a). Esta señal cuadrada es la que controla al transistor $Q3$ como interruptor después de pasar por un Flip-Flop.

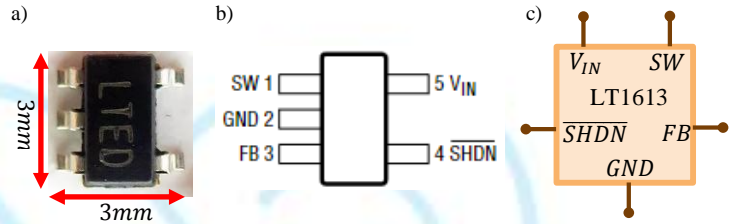


Figura 2. a) Dimensiones del LT1613. b) Disposición física de pines. c) Diagrama del integrado.

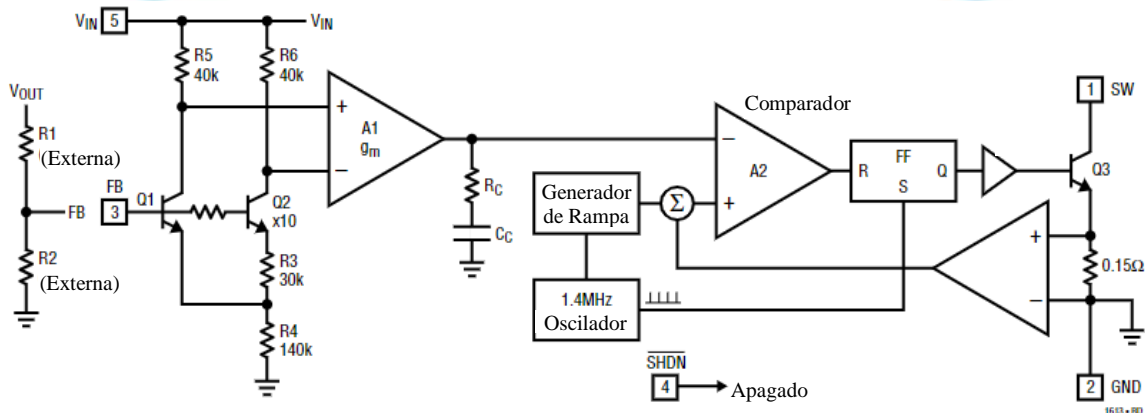


Figura 3. Diagrama de bloques de la configuración interna de un LT1613 [3].

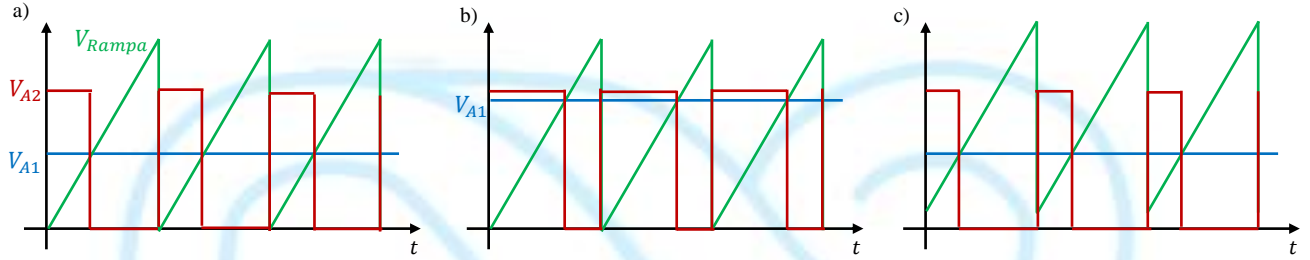


Figura 4. a) Señales comparadas por A2; azul: señal proveniente de A1; verde: rampa y señal de Q3; roja: señal de salida de A2. b) incremento del ciclo de trabajo al aumentar el valor de A1. c) Reducción del ciclo de trabajo aumentando la componente DC de la señal en rampa.

Si el voltaje generado por A1 se incrementa (Figura 4b), es decir, la diferencia entre el voltaje de referencia de 1.23V y el generado por el divisor de voltaje crece, el ciclo de trabajo de la onda cuadrada se incrementará lo cual implica que el transistor estará cerrado por más tiempo y permitirá que el inductor almacene más energía, lo cual implicará que liberará más energía a un CEV produciendo mayor voltaje de salida (V_{out}). Esto producirá una retroalimentación positiva al divisor de voltaje aumentando su valor y en consecuencia reduciendo la diferencia respecto de los 1.23V. Así, esta retroalimentación hace que el voltaje de salida se mantenga estable en un valor definido por el divisor de voltaje.

La retroalimentación estará limitada ya que si el voltaje en la resistencia de Q3 se incrementa mucho, la señal triangular subirá y en consecuencia disminuirá el ciclo de trabajo, haciendo que el inductor libere menos energía y reduciendo el voltaje de salida (Figura 4c).

En resumen, un LT1613 proporciona es un interruptor rápido, el cual permite estabilizar el voltaje de salida de un CEV a través de la retroalimentación de la diferencia de una porción del voltaje de salida respecto de un voltaje de referencia. Dicha porción del voltaje de salida se ajusta mediante un divisor de voltaje simple de forma similar a como se ajusta el ciclo de trabajo en un temporizador 555 [4].

Para implementar un CEV con el LT1613, se sigue el diagrama mostrado en la Figura 5, que si se compara con el diagrama de circuito de la Figura 1b, se pueden identificar fácilmente el inductor ($L1$), el diodo ($D1$) y el capacitor de salida ($C2$).

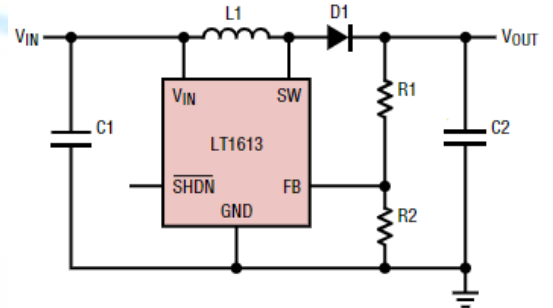


Figura 5. Diagrama de conexión de un LT1613 para implementar un CEV. Las resistencias $R1$ y $R2$ controlan el ciclo de trabajo del interruptor [3].

El capacitor de entrada ($C1$) tiene la función de filtrar alguna posible oscilación en el voltaje de entrada y proteger a la fuente, ya que el integrado, al trabajar en conmutación, exige corrientes variables de la fuente.

Por otro lado, las resistencias $R1$ y $R2$ se encargan de regular el ciclo de trabajo del interruptor a partir de evaluar el voltaje de salida (V_{out}).

De acuerdo a la hoja de datos del LT1613, la ecuación que modela el voltaje de salida es:

$$V_{out} = 1.23V \left(1 + \frac{R1}{R2} \right) \quad (1)$$

Otra anotación importante dada en la hoja de datos es que, para que el integrado funcione, el pin 4 (\overline{SHDN}) debe estar conectado a un voltaje mayor a 1V.

Finalmente, hay que recordar que, si la señal de salida se toma de los polos del diodo, se tendrá una señal alterna producida por el cambio de corriente en el inductor.

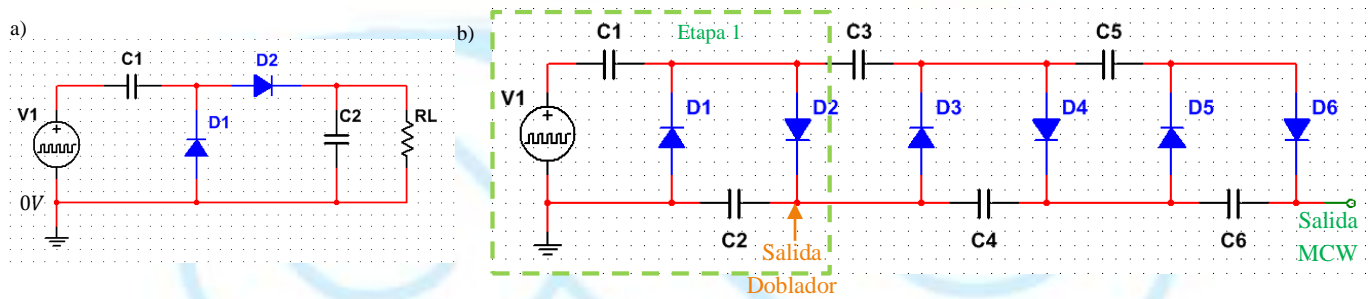


Figura 6. a) Diagrama de circuito de un doblador de voltaje. b) MCW de 3 etapas. Cada etapa consta de dos capacitores y dos diodos.

1.2 MULTIPLICADOR COCKCROFT-WALTON

La segunda sección de la fuente es un Multiplicador Cockcroft-Walton (MCW), el cual puede convertir un voltaje alterno en uno directo o continuo y multiplicar su valor. Consta de varios dobladores de voltaje de media onda encadenados, y cuyo número depende del voltaje de salida que se requiera.

Cada doblador de voltaje (Figura 6a), dos capacitores (C_1 y C_2) y dos diodos (D_1 y D_2). El sistema debe cumplir con la conservación de energía, por lo que existirá una reducción en la corriente. Si la fuente de corriente AC proporciona 1A, se encontrará que a la salida del doblador (a la máxima eficiencia) la corriente será de no más de 0.5A, de forma que la potencia a la entrada y salida del sistema sea la misma, $P = VI = 12W$, si la fuente proporciona un voltaje de 12V.

En un MCW, el doblador de voltaje constituye una etapa y el punto de salida es entre D_2 y C_2 (Figura 6b).

Si el análisis del comportamiento del circuito se hace contando las caídas de voltaje en los diodos, se encuentra que la ecuación que modela el comportamiento del voltaje de un MCW es

$$V_o = 2N(V_p - V_D) \quad (2)$$

Donde N es el número de etapas del MCW (número de dobladores de voltaje), V_p es el voltaje pico de la fuente AC y V_D es el voltaje de caída del diodo utilizado.

2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA FUENTE DE ALTO VOLTAJE

Nuestros requerimientos para construir la fuente son:

1. Tamaño reducido. Esto ayudará a que la fuente sea móvil.
2. Modular. Queremos que el CEV se pueda manejar de forma independiente del MCW, ya que facilita las pruebas de cada elemento, además de que permite usar cada módulo en otros proyectos.
3. CEV ajustable. Esto permite adecuar el voltaje de salida del sistema a las necesidades de voltaje necesarias.

Estos tres requerimientos guiarán el diseño de la fuente, y debido al segundo, el CEV y el MCW se implementarán de forma separada.

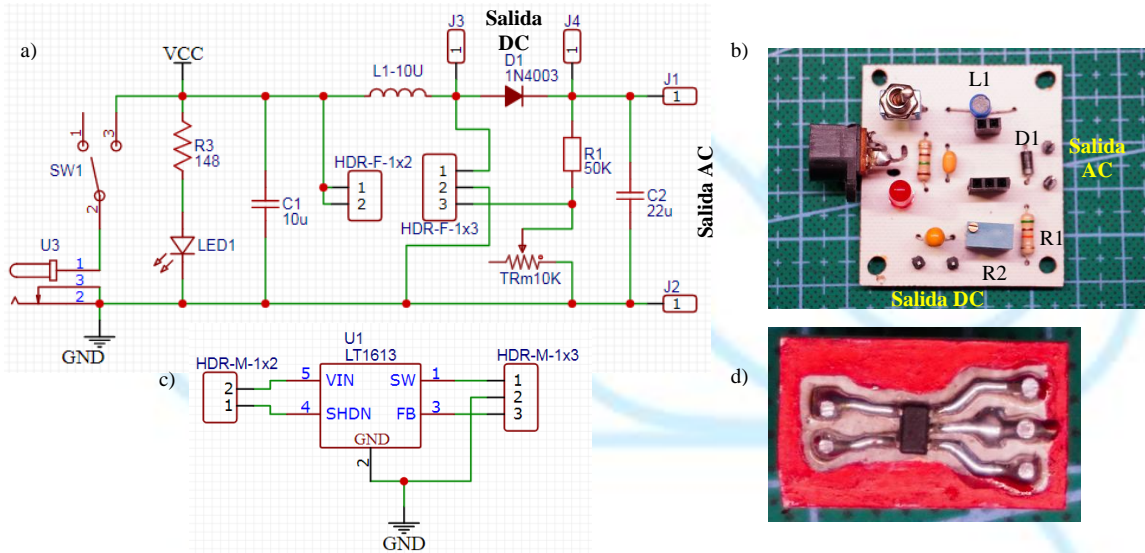


Figura 7. a) Diagrama de circuito del diseño de CEV. b) Implementación del CEV. c) Módulo del LT1613, el cual se conecta en la parte central del circuito del CEV. d) Implementación del módulo LT1613.

2.1 CEV BASADO EN EL LT1613

De lo visto en la sección 1.1, en particular en la Figura 5 y la ecuación (5), para que el elevador sea ajustable, es necesario poder cambiar el valor del voltaje de salida. Para esto, lo más recomendable es hacer que la resistencia $R2$ sea una resistencia variable de precisión (*trimpot*). En nuestro caso se utilizará uno de $10K\Omega$.

También es recomendable utilizar valores de resistencias $R1$ y $R2$ del orden de $k\Omega$, lo cual ayuda a limitar la corriente que fluye por el circuito evitando que los componentes se sobrecalienten y que, en particular, el LT1613 se dañe. En nuestro caso se utilizó una resistencia $R1 = 50k\Omega$, lo cual permitirá obtener voltajes de salida desde 7.5V hasta 60V (este valor se obtiene cuando la resistencia variable toma un valor de $1k\Omega$, y lo cual es el mínimo recomendado, ya que valores menores producirán voltajes de más de 100V los cuales pueden dañar al capacitor de salida). De igual forma, se utilizó un diodo 1N4003 el cual es capaz de soportar voltajes de hasta 200V y corrientes de 1A.

Dado que el voltaje de alimentación planeado es de 5V a 1.5A, la hoja de datos recomienda utilizar un inductor $L1 = 10\mu H$. En cuanto a los capacitores de filtrado se utilizan valores de $C1 = 10\mu F$ y $C2 = 22\mu F$. El diseño e implementación de circuito se muestra en la Figura 7.

Dado que el LT1613 es un elemento de montaje superficial, para poder manejarlo de forma adecuada y sin el riesgo de dañarlo, se implementará en un módulo individual separado el cual se conectará al circuito principal.

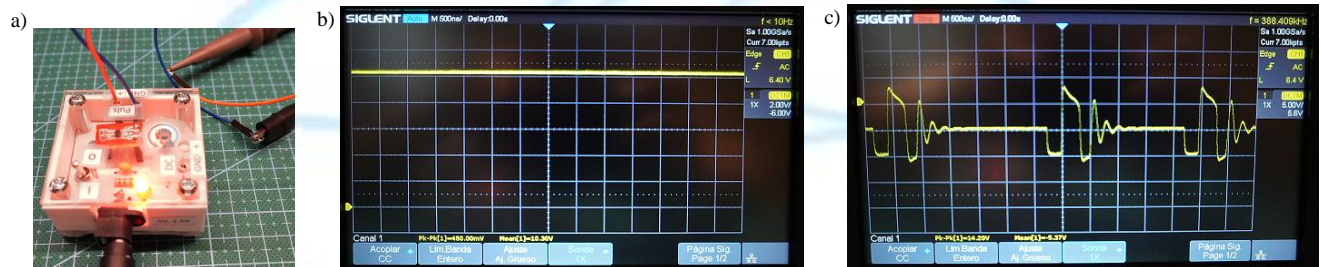


Figura 8. a) Módulo CEV final, con sus salidas DC y AC. b) Señal de salida DC ajustada a 10V promedio. c) Señal de salida AC correspondiente, el valor pico-pico del voltaje es 14.2V.

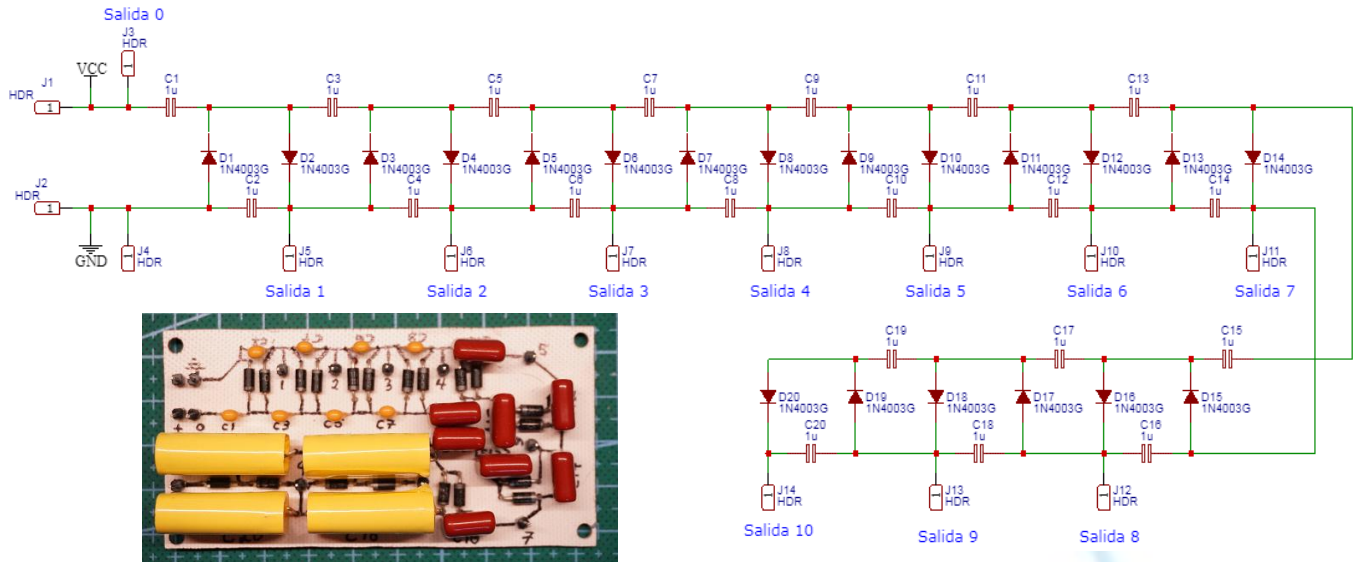


Figura 9. Diseño e implementación de circuito del módulo MCW. Cuenta con diodos 1N4003 y capacitores de alto voltaje.

Finalmente, para reducir el riesgo de cortos, se implementa un sistema interruptor de encendido a la entrada del circuito. En la Figura 8 se muestra el modulo final, la señal de salida DC y la señal de salida AC.

Como se puede observar en la Figura 8b, la señal de salida DC es un voltaje constante el cual se puede ajustar cambiando el valor de la resistencia variable.

Por otro lado, en el circuito se incluyó una salida de señal en el diodo, la cual es alterna y aproximadamente cuadrada (Figura 8d); sin embargo, debido a la impedancia del inductor no es perfecta y presenta oscilaciones considerables. Aun así, en promedio, la amplitud de esta señal tiene un valor pico-pico de 1.4 veces el voltaje de la señal DC. Es de señalar que, cuando el voltaje DC del módulo se incrementa, la amplitud de la señal AC también lo hace.

Esta señal AC será la que se transfiera al módulo MCW, filtrada a DC y amplificada para conseguir el alto voltaje.

2.2 MCW DE VARIAS ETAPAS.

De lo visto en la sección 1.2 y en la referencia [2], podemos diseñar el módulo MCW de forma que tenga varias etapas con sus correspondientes salidas, y así, poder disponer de varias opciones de voltaje multiplicado de salida.

En nuestro caso, el MCW constará de 10 etapas, cada una con su correspondiente salida. Todas cuentan con diodos 1N4003 que soportan hasta 200V y 1A, y generan una caída de aproximadamente 0.5V; también cuentan con capacitores de $1\mu F$, de los cuales los de las primeras 4 etapas soportan hasta 50V, los de las siguientes 4 hasta 150V y los de las dos últimas hasta 250V, para evitar que se puedan dañar por sobrecarga. En la Figura 9 se puede observar el diseño de circuito y su implementación.

El módulo MCW se conectará a la salida AC del CEV y, además de transformar la señal AC en DC, amplificará el voltaje a cambio de reducir la corriente. Posteriormente, se miden los distintos voltajes en las salidas de las etapas y se escoge el más adecuado a nuestras necesidades. En caso de que la salida escogida solo de un voltaje promedio cercano al requerido, se ajusta la resistencia variable del CEV para ajustar el voltaje.

Por ejemplo, en nuestro caso, requerimos de 123V, y la salida de la etapa 8 del MCW proporciona 118V, por lo que ajustando la resistencia variable podemos aumentar la salida hasta alcanzar el voltaje requerido.

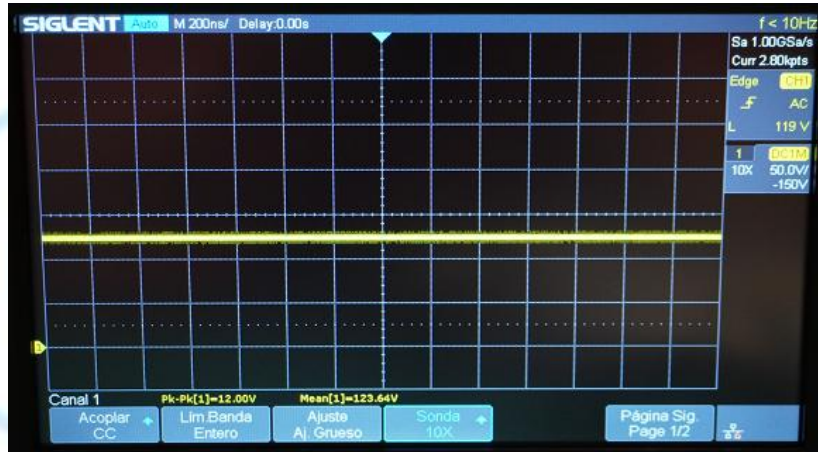


Figura 10. Señal de salida típica del MCW. En particular, corresponde a la salida de la etapa 8.

Una vez alcanzado el voltaje, checamos los voltajes de cada salida, así como el voltaje pico-pico del CEV, lo cual se muestra en la Tabla I. En la Figura 10 se muestra la señal de salida de la etapa 8.

Es importante señalar que el voltaje medido en el CEV (18.6V pico-pico) corresponde al voltaje de salida sin carga. Cuando conectamos el MCW, la amplitud de la señal AC disminuirá ligeramente debido a la carga del MCW y a su impedancia, esta señal se indica en la tabla como etapa 0. NOTA: recordar que en la ecuación (2) se requiere el valor pico de la señal, que en nuestro caso es de 9V.

Por otra parte, podemos comparar los resultados experimentales mostrados en la Tabla I con la predicción dada por la ecuación (2) (con los parámetros $V_D = 0.5V$ y $V_p = 9V$), lo cual se muestra en la Gráfica 1. Como podemos ver, el comportamiento real del MCW no es perfectamente lineal debido a las ineficiencias de los elementos, en particular la impedancia de los capacitores, por lo que se puede apreciar claramente cómo, en las etapas superiores, el voltaje DC cae por debajo de lo predicho. Aun así, para propósitos prácticos, la fuente modular de alto voltaje es funcional.

Como comentarios finales, esta fuente de alto voltaje puede alcanzar hasta 200V en la salida de la etapa 10, por lo que es recomendable tener cuidado con su manejo. Aunque no puede proporcionar corrientes altas es mejor tomar precauciones.

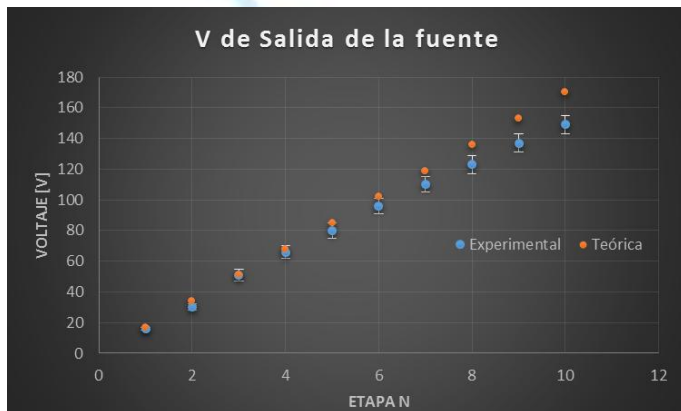


Tabla I. Voltajes de salida de cada etapa (experimentales).					
Etapa	Voltaje [V]	ΔV [V]	Etapa	Voltaje [V]	ΔV [V]
CEV	18.6 (AC)	0.5	5	80	5
0	18 (AC)	0.5	6	96	5
1	16	1	7	110	5
2	30	2	8	123	6
3	51	4	9	137	6
4	66	4	10	149	6

Gráfica 1. Voltajes de salida de cada etapa en la fuente modular, después de ser ajustados, comparados con la predicción teórica.

3 REFERENCIAS

- [1] Barrios Barocio E. *Convertidor Elevador de Voltaje*, Tsikbal-Naat (2024)
<https://tsikbal.github.io/P%C3%A1ginas/%C3%81reas/Electronica/Electronica/CEV.html>
- [2] Ramírez Arvidez R, Barrios Barocio E. *Multiplicador de Cockcroft-Walton*. Tsikbal Naat. (2024).
<https://tsikbal.github.io/P%C3%A1ginas/%C3%81reas/Electronica/Electronica/MCW.html>
- [3] Analog Devices, Linear Technology. *LT1613 Datasheet*, 1997.
<https://www.analog.com/en/products/lt1613.html>