

## Máster en Transformación Energética Power Electronics

# Máquinas eléctricas y sistemas de alta tensión en convertidores

### Práctica: Generación Alta Tensión

José Giménez Llanos  
Álvaro Navarro Jorquera



# Índice

1. Introducción	2
2. Objetivos	3
3. Estado de la técnica	3
4. Establecimiento de requerimientos	4
5. Verificaciones	4
6. Conclusiones	9

## Índice de figuras

1. Multiplicador de Greinacher de 1 etapa . . . . .	2
2. Tensión de salida y entrada a 50Hz (sin carga) . . . . .	5
3. Tensión de salida y entrada a 50Hz con carga . . . . .	5
4. Corriente en la carga y sistema de medida . . . . .	6
5. Tensión máxima en condensadores y diodos . . . . .	7
6. Tensión en el multímetro . . . . .	7
7. Tensión de salida y corriente en la carga para múltiples frecuencias .	8
8. Tensión de salida y entrada con señal de entrada de onda cuadrada .	9

## 1. Introducción

En este entregable se realiza el diseño y análisis de un circuito multiplicador de tensión basado en el Duplicador de Greinacher. Este circuito, el cual se puede ver en la figura 1, se basa en el principio del rectificador de medio puente.

El condensador  $C1$  se carga para tensiones de entrada desde  $-\hat{V}$  hasta  $+\hat{V}$  ( $\frac{dV}{dt}$  positivo) y se descarga a través del diodo  $D2$  durante las variaciones de tensión de entrada  $\frac{dV}{dt}$  negativas, cargando así el condensador  $C2$ . Este proceso se repite durante varios ciclos, hasta llegar a un punto en el que el condensador  $C1$  quede cargado a la tensión de pico de la senoidal de entrada y el condensador  $C2$  al doble de la tensión de pico de entrada. Esto se produce puesto que, en los ciclos de tensión de entrada negativa, la tensión soportada por el condensador  $C2$  es la del condensador  $C1$  sumada a la tensión de la fuente.

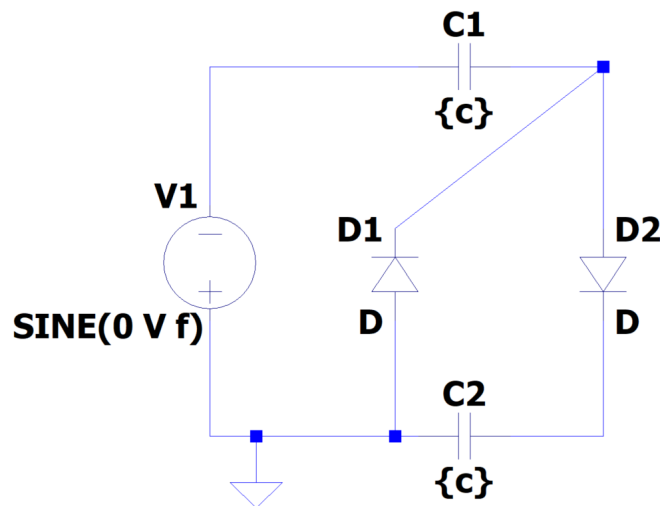


Figura 1: Multiplicador de Greinacher de 1 etapa

Además, cabe destacar que este circuito es escalable, permitiendo de manera teórica obtener tensiones de salida infinitas a partir de fuentes de tensión oscilatorias de bajo voltaje.

## 2. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es conseguir diseñar un Multiplicador de Greinacher que permita obtener una tensión de salida específica. Además, debe ser capaz de proveer cierta cantidad de corriente de salida sin que se produzca una caída significativa de la tensión, de manera que será necesario dimensionar correctamente la capacidad de los condensadores. Por otra parte, el circuito debe ser capaz de funcionar en un rango de frecuencia definido y para tensiones de entrada senoidales y cuadradas. También será necesario diseñar un circuito que permita medir la tensión de salida a partir de un multímetro. Todos los requisitos se definen de manera específica en la sección 4.

## 3. Estado de la técnica

Para la construcción del Multiplicador de Greinacher será necesario obtener el número de etapas necesarias a partir de la tensión de pico de entrada y la tensión continua requerida a la salida. A partir de ahí se seleccionarán los componentes (diodos y condensadores), los cuales deben ser capaces de soportar las tensiones máximas a las que se puedan someter.

Respecto a la carga, puesto que la tensión de salida es continua, se dimensionará una resistencia para que circule a través de la misma la corriente deseada. Dicha resistencia, en el circuito real, deberá ser seleccionada para que pueda soportar la potencia a disipar. Puesto que la tensión de salida será elevada, corrientes de miliamperios pueden producir potencias de decenas de vatios que deberán ser disipadas por la resistencia.

Para el diseño del circuito de medida de tensión, se utilizará un divisor resistivo con un multímetro en paralelo con la resistencia de debajo del divisor. De esta manera, la resistencia total de debajo del divisor estará limitada por la resistencia del multímetro. Consecuentemente, puesto que se debe construir el circuito para obtener corrientes mínimas, se diseñará para que la resistencia de debajo del puente total sea lo más cercana posible a la resistencia del multímetro.

## 4. Establecimiento de requerimientos

Los requerimientos del circuito se dividen, en este caso, en los requerimientos del Multiplicador de Greinacher y los del equipo de monitorización de tensión de salida. Los requerimientos del Multiplicador de Greinacher son los siguientes:

- Tensión de salida:  $3kV \pm 5\%$  ( $DC$ )
- Corriente de salida:  $5mA$
- Rizado máximo:  $\pm 10\%$
- Tensión de entrada:  $220V$  ( $AC$ )
- Tensión de trabajo de componentes:  $< 1000V$
- Rango de frecuencia de entrada:  $[50Hz, 200Hz]$
- Forma de tensión: senoidal o cuadrada

Respecto al equipo de monitorización, debe cumplir los siguientes requisitos para que el funcionamiento del circuito se vea lo menos afectado posible al utilizarlo:

- Consumo de corriente mínimo
- Tensión máxima de  $200V$ , correspondiente con la tensión máxima de salida

## 5. Verificaciones

En esta sección se va a justificar mediante las simulaciones necesarias que el funcionamiento del circuito es el correcto. Primero, se comprueba que la tensión de salida sin carga es igual a la esperada. En la figura 2 se puede ver que, al transcurrir un tiempo de aproximadamente 5 segundos, la tensión de salida se estabiliza en  $3101V$ , valor que supone un error mínimo del  $0,33\%$  respecto a la tensión de salida esperada sin carga ( $3111,27V$ ), como se puede ver en la siguiente expresión:

$$E_{V_{load}} = \frac{3111,27V - 3101V}{3111,27V} \cdot 100 = 0,33\% \quad (1)$$

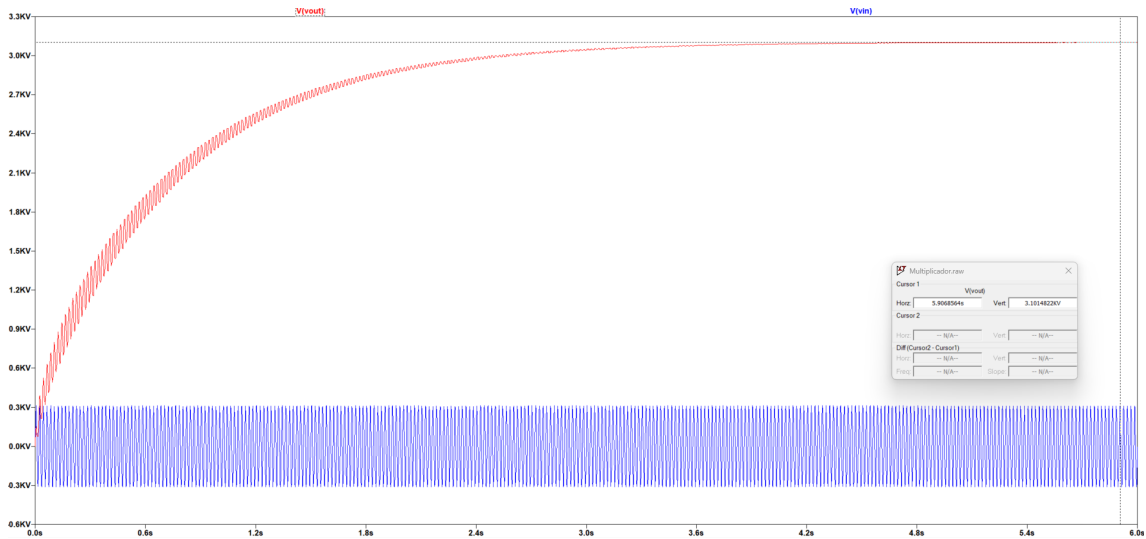


Figura 2: Tensión de salida y entrada a 50Hz (sin carga)

Además, podemos garantizar que la tensión obtenida está dentro del rango de tensión de salida especificado, puesto que la tensión máxima establecida (5 % de  $3kV$ ) es de  $3150V$ .

Tras comprobar que el circuito funciona correctamente, pasamos a conectar la carga y el circuito de medida. Respecto del caso anterior, el tiempo de establecimiento es similar y no relevante puesto que no existe ningún requerimiento respecto del mismo, por lo que se pasa a analizar la tensión de salida en estacionario, obteniendo el resultado 3.

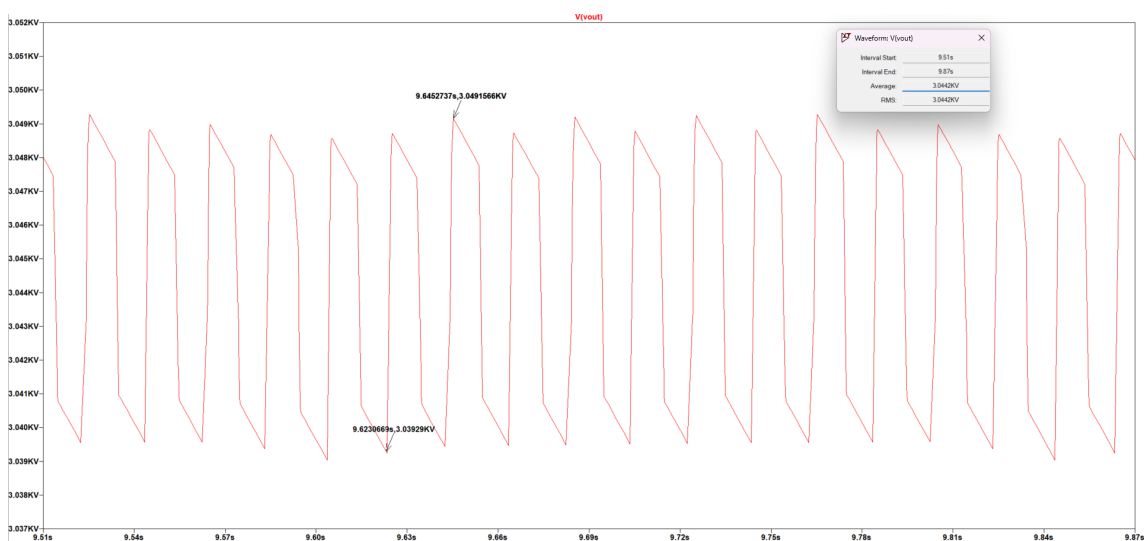


Figura 3: Tensión de salida y entrada a 50Hz con carga

Como se puede ver en la figura 3, se obtiene una tensión media de  $3044V$ , una tensión máxima de  $3049V$  y una tensión mínima de  $3039V$ . De esta manera, se puede garantizar que el requisito de rizado de  $10V$  para  $50Hz$  sí se cumple, y el error obtenido para la tensión media es mínimo:

$$E_{V_{load}} = \frac{3047,93V - 3044V}{3047,93V} \cdot 100 = 0,13\% \quad (2)$$

Respecto a la corriente, se analiza en la figura 4 la corriente que circula a través de la carga y la que circula a través del circuito de medida. Puesto que, como se explica en la sección anterior, la tensión de salida es ligeramente menor a la esperada, en consecuencia la corriente en la carga también lo será, midiendo un valor de  $4,898mA$ . La corriente a través del circuito de medida se ha diseñado para no ser significativa, dando un valor de  $21,718\mu A$ . El error cometido en la corriente a través de la carga es el siguiente:

$$E_{I_{load}} = \frac{5mA - 4,898mA}{5mA} \cdot 100 = 2,04\% \quad (3)$$

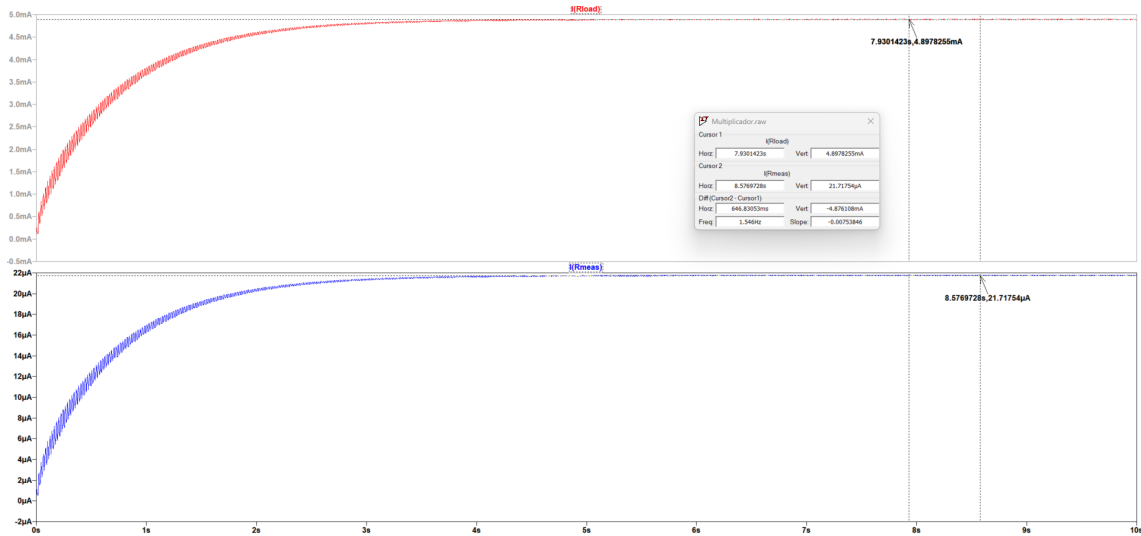


Figura 4: Corriente en la carga y sistema de medida

Por otra parte, también es necesario analizar la tensión máxima en los semiconductores y condensadores, cuyo resultado se puede ver en la figura 5. La tensión máxima es de  $618,33V$  (aproximadamente el doble a la de la fuente), mucho menor a los  $1000V$  establecidos como máximo, por lo que este requerimiento está cumplido. Además, cabe destacar que el primer condensador ( $C1$ ) se carga a una tensión igual

a la de la fuente, por lo que se puede utilizar un condensador de menor rango de tensión para este caso.

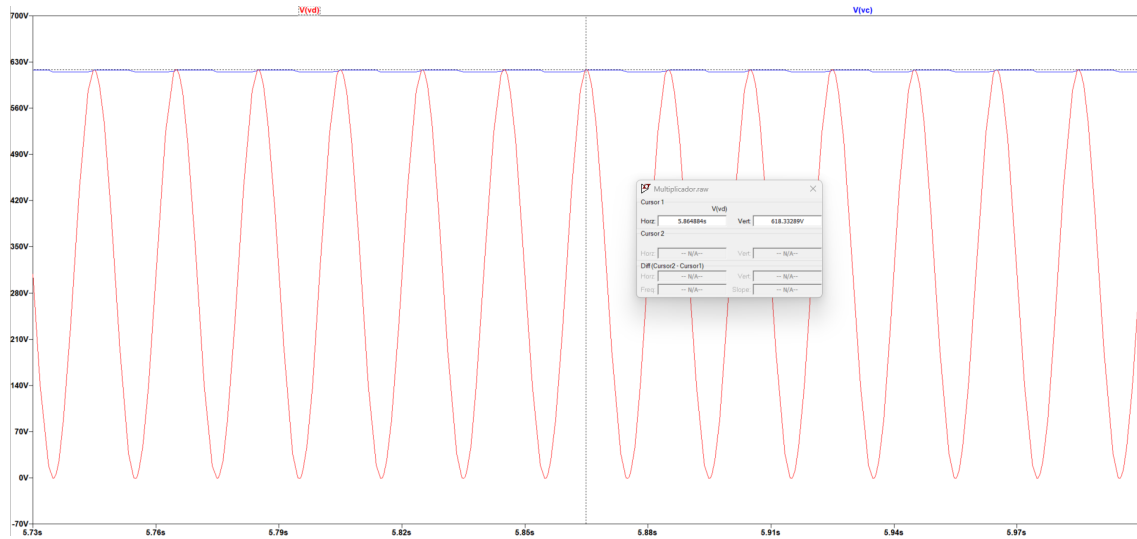


Figura 5: Tensión máxima en condensadores y diodos

También es necesario comprobar que la tensión en el multímetro no supera los 200V establecidos. Puesto que se definió el divisor para obtener 200V para la máxima tensión de salida posible (3111,27V), en este caso la tensión medida será necesariamente menor, dando un valor de 195,91V como se puede ver en la figura 6.

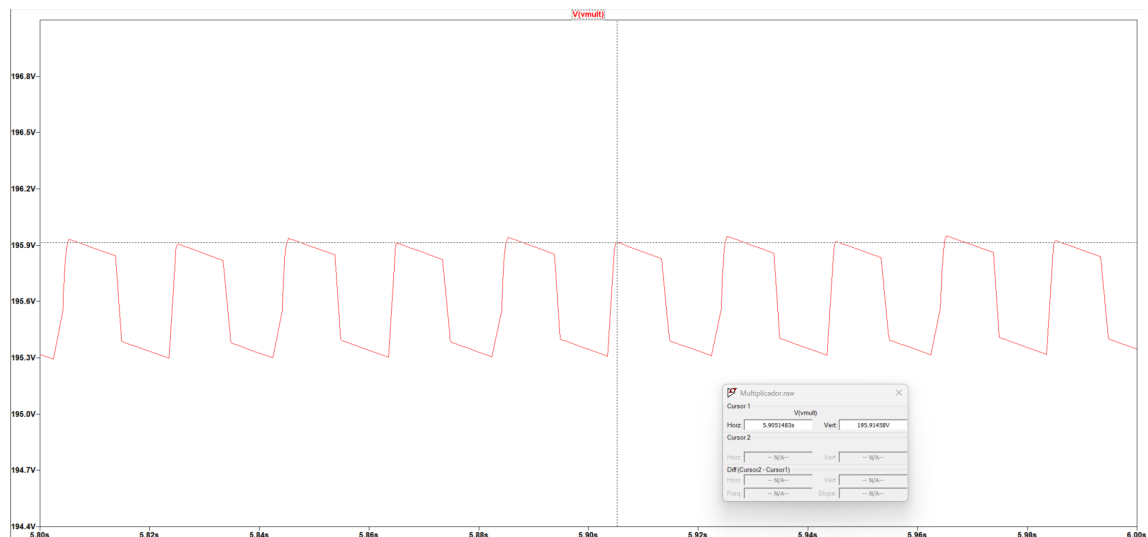


Figura 6: Tensión en el multímetro



En la figura 7 se puede ver la tensión de salida y corriente de carga a 50Hz (gráfica roja), 100Hz (gráfica azul), 150Hz (gráfica verde) y 200Hz (gráfica azul claro). Como se ha calculado previamente la tensión obtenida aumenta con la frecuencia, lo que produce un aumento de la corriente en consecuencia. Se obtiene una tensión de salida de 3090V y una corriente de carga de 4,963mA para una frecuencia de 200Hz. Obtenemos los errores respecto a los valores esperados:

$$E_{V_{load-200Hz}} = \frac{3095,44V - 3090V}{3095,44V} \cdot 100 = 0,18\% \quad (4)$$

$$E_{I_{load-200Hz}} = \frac{5mA - 4,963mA}{5mA} \cdot 100 = 0,74\% \quad (5)$$

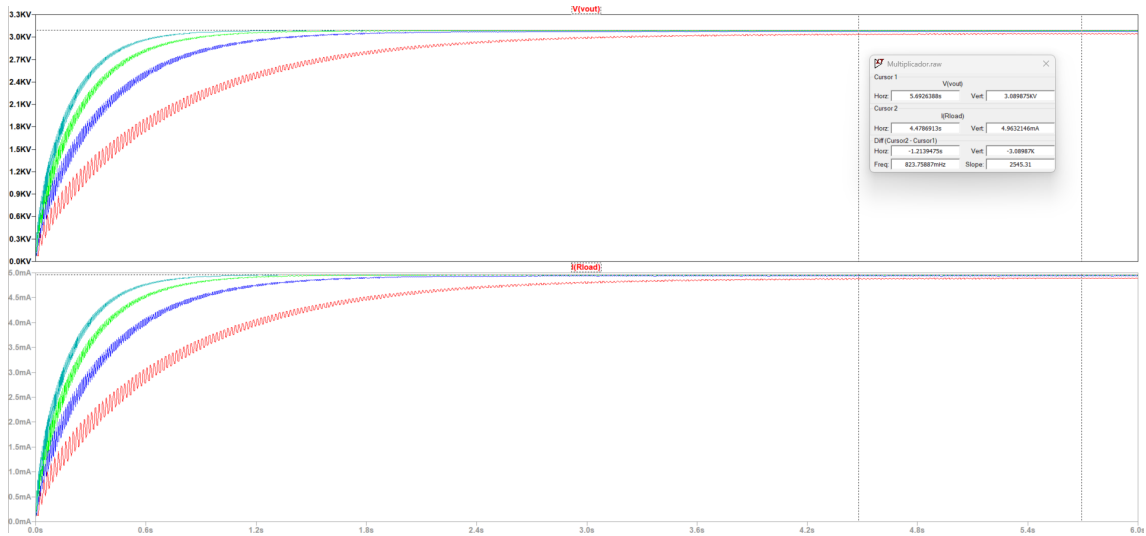


Figura 7: Tensión de salida y corriente en la carga para múltiples frecuencias

Finalmente, se comprueba al funcionamiento del circuito para una señal de entrada cuadrada de 50Hz, con valores máximos y mínimos iguales a los valores de pico positivo y negativo de la senoidal y con un ciclo de trabajo del 50 %. El resultado se puede ver en la figura 8, donde se obtiene un valor medio de 3044V exactamente igual que el obtenido con la senoidal de misma frecuencia. También se mantiene el mismo rizado de 10V del caso anterior.

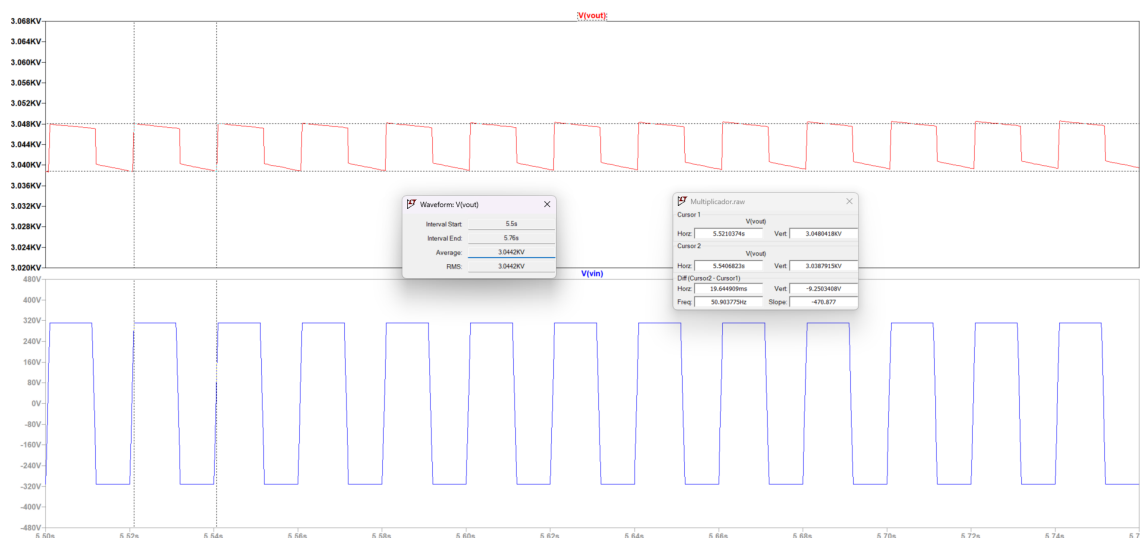


Figura 8: Tensión de salida y entrada con señal de entrada de onda cuadrada

## 6. Conclusiones

En esta práctica se ha llevado a cabo el diseño y simulación de un circuito multiplicador de Greinacher capaz de proporcionar a la salida 3 kV a partir de una fuente de 220 V, asegurando un adecuado suministro de corriente sin un rizado y caída de tensión significativo. Para lograrlo se ha realizado un dimensionamiento de los condensadores a partir de un valor seleccionado de rizado de pico a pico máximo igual a 10V.

Por otro lado, se ha diseñado un circuito sencillo de medida de tensión a partir de un divisor de tensión de tal forma que se puede medir la tensión de salida del multiplicador en un fondo de escala de 200V.

Además, en las simulaciones se ha podido comprobar el correcto funcionamiento del circuito y la fiabilidad de los cálculos teóricos, los cuales han proporcionado aproximaciones con poco error.

Con los resultados obtenidos se puede destacar el atractivo de este tipo de soluciones para conseguir una elevada tensión a partir de una estructura sencilla basada en diodos y condensadores para aplicaciones que requieran de una elevada tensión sin la complejidad de circuitos conmutados o transformadores. También se destaca la funcionalidad del multiplicador diseñado, el cual ha demostrado ser apto para un amplio rango de frecuencias (de 50 a 200 Hz) y para una señal senoidal y cuadrada.

Por otro lado, estos circuitos presentan ciertas limitaciones que deben considerarse. En aplicaciones con cargas altamente variables, la caída de tensión resultante puede afectar a su rendimiento. Asimismo, su empleo puede ser complicado en aplicaciones con mucha variación de la frecuencia, especialmente cuando la frecuencia es demasiado baja. Otro inconveniente es el tiempo de carga relativamente lento, lo que puede ser problemático en sistemas que requieran una respuesta rápida en la elevación de la tensión. Por último, este tipo de circuitos suelen estar restringidos a aplicaciones de baja potencia, ya que su capacidad de suministrar corriente es limitada.