



# Diseño de una Fuente de Alto Voltaje

*Ms. C. Ing. José Enrique Eirez Izquierdo*

*Dr. C. Ing. Fabriciano Rodríguez González*

*Dr. C. Ing. Sonia Pavoni Oliver*

266 30 51, [joseenrique.ei@electronica.cujae.edu.cu](mailto:joseenrique.ei@electronica.cujae.edu.cu)

266 30 52, [fabriciano.rodriguez@electronica.cujae.edu.cu](mailto:fabriciano.rodriguez@electronica.cujae.edu.cu)

266 30 51, [sonnia.pavoni@electronica.cujae.edu.cu](mailto:sonnia.pavoni@electronica.cujae.edu.cu)

## RESUMEN / ABSTRACT

Este documento presenta las experiencias en el diseño de una fuente de alto voltaje, basada en multiplicadores de media onda. La fuente garantizará un voltaje de salida en el orden de  $10^2$  V y una corriente en el orden de  $10^{-3}$  A. Se muestran y analizan resultados experimentales encaminados a su aplicación en la alimentación de un generador de pulsos de alto voltaje.

Palabras claves: Alto Voltaje, multiplicadores, fuente de alimentación.

*This paper shows a high voltage power supply design experiences realized by half wave multipliers. The source supplies an output voltage in order of  $10^2$  V and current of the order  $10^{-3}$  A. Experimental results of the power supply applied to a high voltage pulses generator are shown and analyzed.*

*Key words: High Voltage, multipliers, power supply.*

*Título en Inglés: A High Voltage Source Design.*

## INTRODUCCIÓN

Un elemento fundamental en el desarrollo de un sistema electrónico es la selección o diseño de la fuente de alimentación. En este sentido pueden encontrarse en la literatura diversas variantes circuitales tales como reguladores de voltaje, fuentes conmutadas, entre otras [1]. La importancia de la fuente de alimentación para cualquier sistema radica, en que es la encargada de suministrar la energía necesaria para su correcto funcionamiento. Además en el caso de las fuentes de corriente directa con salida estabilizada, su capacidad de mantener el voltaje constante en la salida, es una cuestión de vital importancia y en la cual no se escatiman recursos.

Existen aplicaciones donde se necesita que los voltajes de alimentación sean del orden de  $10^2$  V, por ejemplo, en los generadores de pulsos basados en la topología de Banco *Marx* [2]. Este tipo de circuito consiste en un número  $n$  de capacitores que se cargan en paralelo aproximadamente al voltaje de alimentación  $V_{CC}$ . Posteriormente son conectados en serie y producen un voltaje igual a  $n \cdot V_{CC}$ , en los terminales de salida [2]. Estos generadores consumen corrientes en el orden de los  $10^{-3}$  A. Teniendo en cuenta estos aspectos, se decidió fabricar una fuente basada en multiplicadores de voltaje.

Aunque este tipo de fuente esta descrita en la literatura se han encontrado pocos reportes de experiencia práctica en el diseño de este tipo de circuito y su aplicación en la alimentación de un Banco de *Marx*. El objetivo de este artículo es mostrar nuestras

experiencias en este sentido. Se presentarán el estudio teórico, el diseño, la simulación y los resultados experimentales de una fuente que garantice un voltaje de salida de 300 V y una corriente de salida en el orden de  $10^{-3}$  A. Como ya se dijo se ha seleccionado como configuración un circuito multiplicador de voltaje de media onda [3], que con sólo diodos, capacitores y corriente alterna se pueden obtener diversos niveles de directa. Este tipo de fuente con multiplicadores además de poder utilizarse en generadores de pulsos [4], son utilizados en fuentes de alimentación de los televisores y en aplicaciones espaciales [5] entre otras.

## MULTIPLICADORES DE VOLTAJE. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Este tipo de circuito permite obtener un voltaje con un nivel de directa igual a un factor entero multiplicado por el valor pico de la señal de entrada. El principio de operación de estos circuitos es la carga sucesiva de condensadores debido a la habilitación en cascada de diodos. En la Figura 1 se muestra el esquema de este tipo de fuente.  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  y  $D_4$  son diodos,  $V_{C1}$ ,  $V_{C2}$ ,  $V_{C3}$  y  $V_{C4}$  son los voltajes en los capacitores y  $V_{O1}$ ,  $V_{O2}$ ,  $V_{O3}$  y  $V_{O4}$  son voltajes medidos en diferentes nodos del circuito. Este tipo de circuito eleva el voltaje de salida a dos, tres, cuatro o más veces el voltaje máximo de la señal de entrada rectificada, como se puede apreciar en la Figura 2 y se explicará en la siguiente sección.

## MULTIPLICADOR DE VOLTAJE DE MEDIA ONDA

Para multiplicar por tres o por cuatro el voltaje de entrada pico  $V_m$  pueden conectarse en cascada dos duplicadores de media onda. Como se muestra en la Figura 2, durante el primer cuarto de ciclo ( $0 \leq \omega t \leq \pi/2$ ) del voltaje de entrada  $v_s$ , el capacitor  $C_1$  se carga a  $V_m$  a través de  $D_1$ . Durante el tercer cuarto de ciclo ( $\pi \leq \omega t \leq 3\pi/2$ ), observe que se aplica al capacitor  $C_2$  a través de  $D_2$ , un voltaje  $2V_m$ , pues al voltaje  $v_s$  de la fuente se suma el del capacitor  $C_1$  que ya estaba cargado a  $V_m$ . Entonces el capacitor  $C_2$  se carga a  $2V_m$  por medio de  $C_1$  y  $D_2$ . Durante el quinto cuarto de ciclo ( $2\pi \leq \omega t \leq 5\pi/2$ ), el capacitor  $C_3$  se carga a  $2V_m$  a través de  $C_1$ ,  $C_2$  y  $D_3$ . Durante el séptimo cuarto de ciclo ( $3\pi \leq \omega t \leq 7\pi/2$ ), el capacitor  $C_4$  se carga a  $2V_m$ , por medio de  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  y  $D_4$ .

Dependiendo de las conexiones de salida ( $V_{O1}$  voltaje en el capacitor  $C_1$ ,  $V_{O2}$  voltaje en el capacitor  $C_2$ ,  $V_{O3}$  suma de los voltajes en los capacitores  $C_1$ - $C_3$  y  $V_{O4}$  suma de los voltajes en los capacitores  $C_2$ - $C_4$ ), el voltaje de salida de estado estable puede ser  $V_m$ ,  $2V_m$ ,  $3V_m$  o  $4V_m$ . Si se utilizan más secciones de diodo y capacitor, cada capacitor se cargará a  $2V_m$ . El voltaje pico inverso (VPI) de cada diodo es  $VPI = 2V_m$ , por lo que deben completarse un par de ciclos antes de que se alcancen las condiciones de estado estable [4-7].

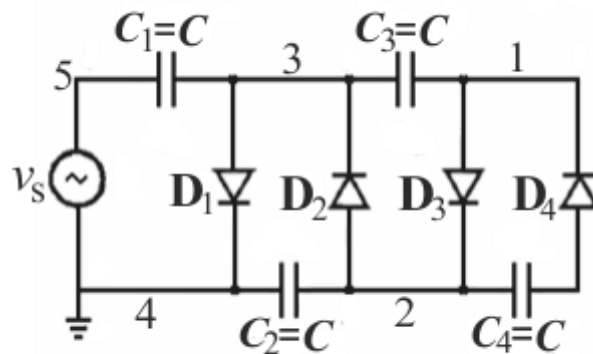


Figura 1: Circuito eléctrico del cuadruplicador de voltaje

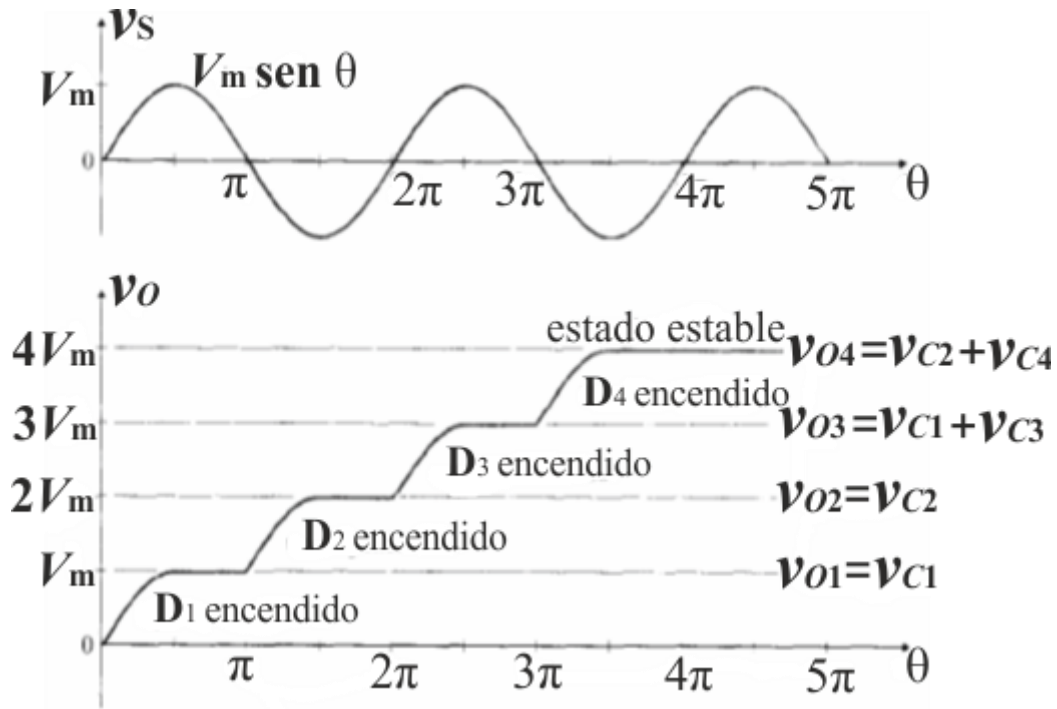


Figura 2: Formas de ondas de un multiplicador de voltaje [6]

## FUENTE DE ALTO VOLTAJE BASADA EN MULTIPLICADORES DE VOLTAJE

Con una topología similar a la del cuadruplicador, mostrado en la Figura 1, variando el número de etapas, puede diseñarse una fuente de alto voltaje. En el diseño que se expone en este trabajo, se utilizó el circuito de la Figura 3, que solo difiere del discutido en la sección anterior en que se incluyen 2 capacitores y 2 diodos más. Esta modificación tiene como fin poder lograr un multiplicador de seis etapas y así alcanzar el voltaje máximo deseado  $V_{900} = 6V_m$ . O sea el circuito propuesto tiene 6 diodos 1N4007 y 6 capacitores polarizados (el terminal positivo es el de la derecha en la Figura 3) de 22  $\mu\text{F}$  y 250 V cada uno.

En la entrada, representada por la fuente  $V_{AC}$  en la Figura 3, se le aplican 110 Vrms de corriente alterna. Si la salida  $V_{900}$ , se toma entre los nodos 2 (negativo) y 7 (positivo) del circuito, se obtienen alrededor de 900 V de corriente directa (dados por la suma de los voltajes de los capacitores  $C_2$ ,  $C_4$  y  $C_6$ ). De este nivel serán analizados en este documento alrededor de 300 V (denominado  $V_{300}$ ), para ello puede tomarse la salida entre los nodos 2 (negativo) y 4 (positivo), o sea en el capacitor  $C_2$  y 900 V (denominado  $V_{900}$ ) tomados entre los nodos 2 (negativo) y 7 (positivo). Se decidió hacer la fuente de modo que pudiera alcanzar más de 900 V, porque esto permite obtener varios niveles de voltajes, tomados en distintos puntos del multiplicador.

## RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Se utilizó el programa *PSpice8* para la simulación del multiplicador de 6 etapas propuesto en la Figura 3. Con el fin de simular el comportamiento de la Red de Distribución Nacional (RDN), se empleó una fuente de voltaje de alterna sinusoidal ( $V_{AC}$ ) que se configuró con una amplitud  $V_m = 155,56$  V y frecuencia  $f = 60$  Hz.

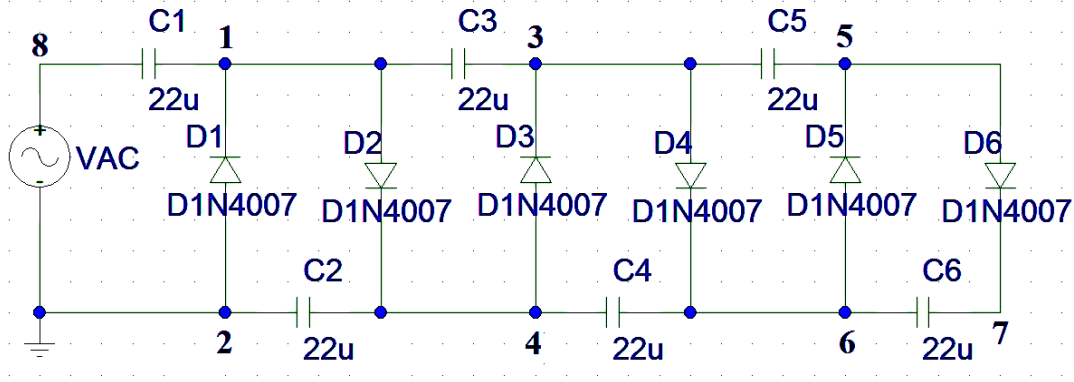


Figura 3. Multiplicador de seis etapas simulado

En la Figura 4 se muestran los resultados de la simulación correspondientes a los voltajes  $V_{AC}$ ,  $V_{300}$  y  $V_{900}$ . También se puede apreciar que en un tiempo de alrededor de 0,9 s se establece el valor de voltaje de  $V_{300}$  y  $V_{900}$ , los cuales se mantienen estables a lo largo del tiempo de simulación.

Por otra parte,  $V_{300}$  en un tiempo de aproximadamente 0,9 s se establece alrededor de 300 V (exactamente 308,54 V). Por último,  $V_{900}$ , que es la suma de los voltajes de los capacitores  $C_2$ ,  $C_4$  y  $C_6$ , como se observa en el resultado de la simulación, tras un tiempo de establecimiento alcanza un valor de 900 V (exactamente 922,466 V). Estas simulaciones se hicieron sin carga aplicada en las salidas ( $V_{300}$  y  $V_{900}$ ).

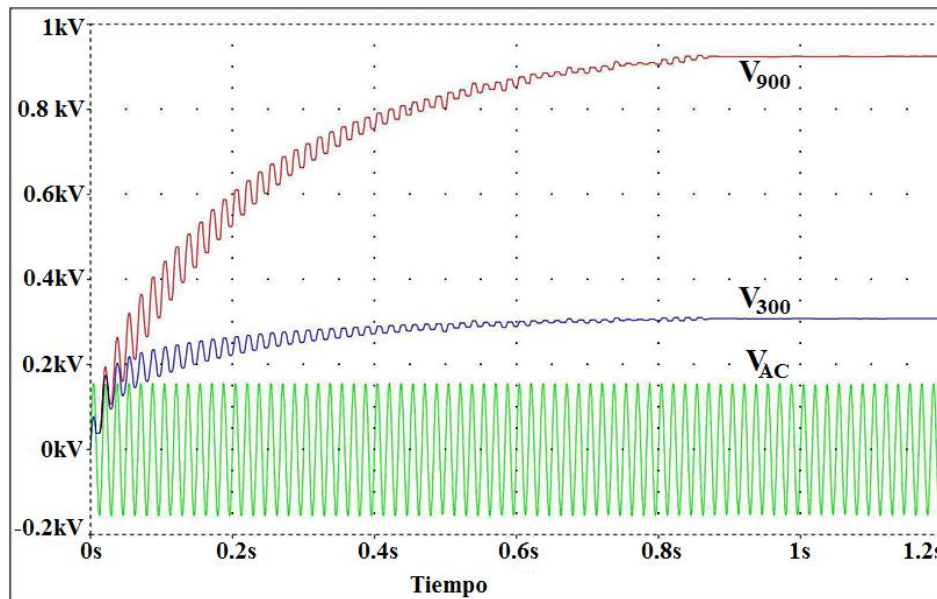


Figura 4. Resultados de la simulación en PSpice8 del multiplicador de seis etapas

Después de analizar los datos obtenidos en la simulación, se comprobó que están en correspondencia con los valores esperados. El capacitor  $C_2$  se debe cargar a  $2V_m = 311,13$  V y en la simulación  $V_{300}$  alcanzó en 0,9 s el 99,17 % de este valor. Algo similar ocurre con  $V_{900}$ , que en 0,9 s llegó al 98,83 % de  $6V_m = 933,38$  V, que es el valor esperado para esta variable.

Se simuló también el circuito de la Figura 3, pero en este caso con un resistor de 1 M $\Omega$  conectado entre los nodo 2 y 4. Esta simulación se realizó con el fin de medir la corriente que pasa por dicha resistencia, la cual puede ser calculada con un simple despeje de una Ley de Ohm según las expresiones (1) y (2):

$$V_{300} = I_L R \quad (1)$$

$$I_L = \frac{V_{300}}{R} = \frac{300 \text{ V}}{1 \text{ M}\Omega} = 300 \mu\text{A} \quad (2)$$

Además, se desea conocer cuál es el valor de  $V_{300}$  ante la presencia de una carga que le demande una corriente distinta de cero, para saber la variación de voltaje con respecto a cuando no tiene carga aplicada.

En la Figura 5b se muestra, como resultado de la simulación, la corriente que deberá entregar el multiplicador a dicha carga de  $1 \text{ M}\Omega$ ,  $I_L$  tiene un valor de  $307,436 \mu\text{A}$ , lo cual representa un error relativo al calculado ( $300 \mu\text{A}$ ) de un  $2,47 \%$ . También se puede apreciar que en alrededor de  $1$  segundo se establece el valor de  $V_{300}$  ( $307,688 \text{ V}$ ), el cual se mantiene estable a lo largo del tiempo de simulación. Se aprecia una ligera disminución de este con respecto a su valor ( $308,54 \text{ V}$ ) sin carga, como se esperaba.

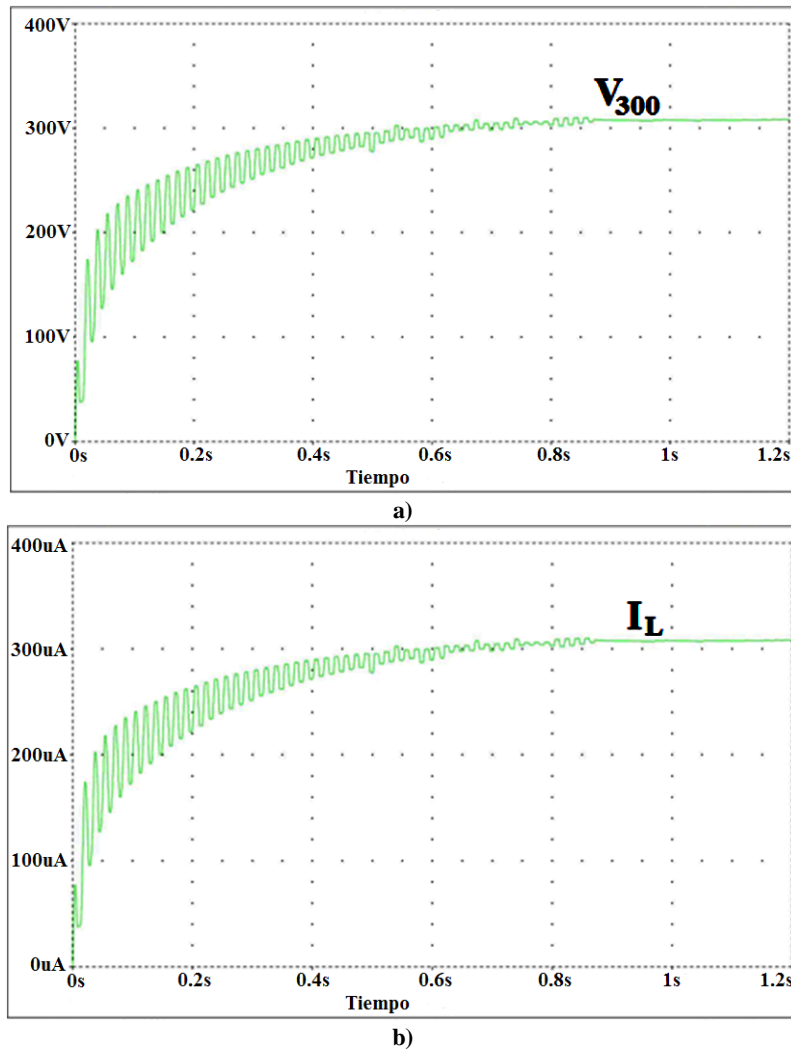


Figura 5. Resultados de la simulación del circuito de la Figura 3 con carga de  $1 \text{ M}\Omega$ , a)  $V_{300}$  y b)  $I_L$

## MATERIALES Y MÉTODOS DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

El circuito mostrado en la Figura 3 se montó y para verificar cómo se iba a comportar ante diferentes condiciones de trabajo, se le hicieron tres tipos experimentos: sin carga ( $R_L = \infty$ ), con una carga  $R_L = 1 \text{ M}\Omega$ , y con el circuito Banco *Marx* como carga. En cada experimento se hicieron mediciones simultáneas con tres multímetros *Agilent 34401A, 6½ Digit Multimeter*: dos de ellos midiendo voltaje (en  $V_{300}$  y  $V_{AC}$ , según el experimento) y el tercero, para evaluar la corriente en la carga. Para cada variable se tomaron alrededor de 100 muestras en cada experimento, separados por un intervalo de tiempo de 30 s. Los datos fueron procesados estadísticamente y graficados con el programa EXCEL de Office 2007.

También se midió el voltaje de rizado utilizando el osciloscopio, *HAMEG Instruments, Analog Digital Scope HM 1507*.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES DE $V_{300}$ PARA DIFERENTES CARGAS

Uno de los experimentos fue medir  $V_{300}$  tomado entre los nodos 4 (positivo) y 2 (negativo) de la Figura 3. Las condiciones fueron las siguientes ( $V_{AC} \text{ rms} = 110 \text{ V}$  de alterna (procedente de la Red de Distribución Nacional), con los puntos 2 y 7 (Figura 3) en circuito abierto, sin carga aplicada ( $R_L = \infty$ ). Además se midió el voltaje de rizado que presentaba  $V_{300}$  bajo las condiciones dadas.

Después de procesar los datos obtenidos, se presenta un gráfico que ilustra el comportamiento de  $V_{300}$  ante un resistor de carga de valor infinito, con respecto al tiempo. Los resultados se muestran en la Figura 6, donde se puede apreciar que  $V_{300}$  presenta un valor promedio aproximado de 334,88 V, con una desviación estándar de 1,97 V. El error relativo entre este valor medio obtenido y el esperado (311,13 V) es 6,52 %.

Para  $V_{300}$  frente a una carga de 1 Mohm, se obtuvo un valor promedio de 333,49 V y una desviación estándar de 2,17 V. El error relativo entre el valor medio obtenido y el esperado (311,13 V) es 7,18 %.

Finalmente  $V_{300}$  frente al Banco *Marx* como carga, tiene un valor promedio de 331,42 V y una desviación estándar de 4,13 V. El error relativo entre el valor medio obtenido y el esperado (311,13 V) es 6,52 %.

Buscando un promedio, de los valores promedio, se aprecia que para diferentes cargas se mantiene cerca de 333,26 V, aspecto de gran importancia ya que evidencia cuan estable se puede mantener la salida de voltaje de la fuente, ante condiciones de trabajo específicas.

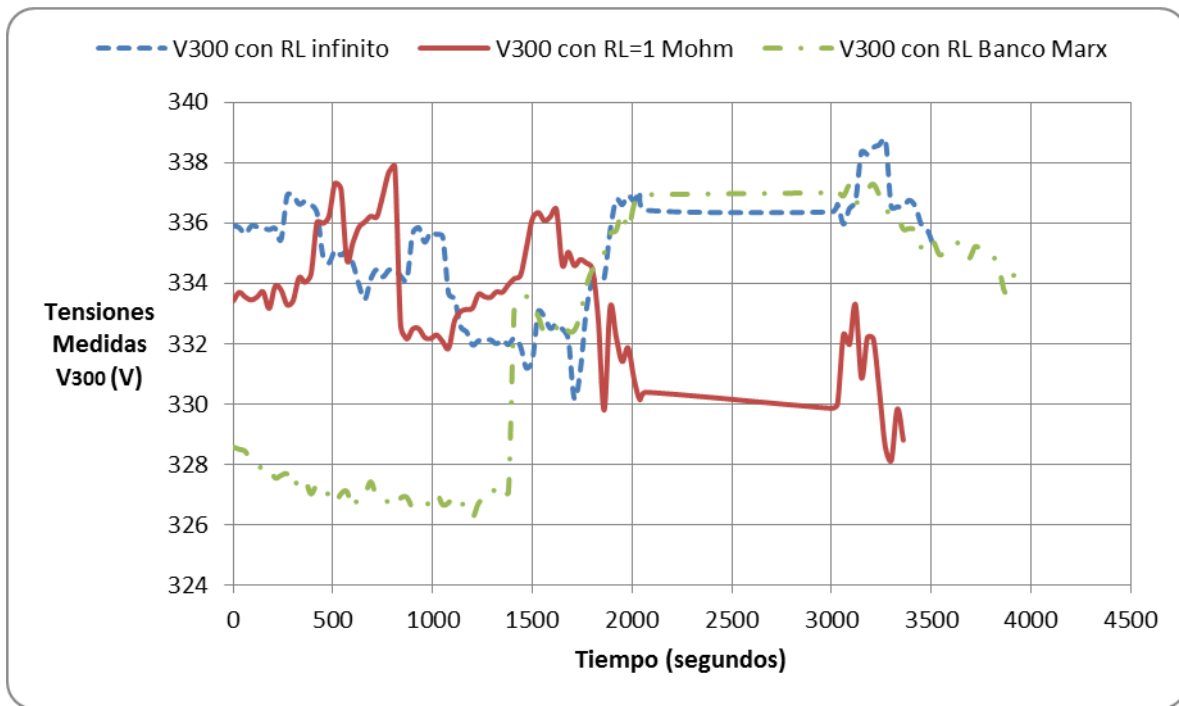


Figura 6. Comportamiento de  $V_{300}$  en función del tiempo, para diferentes cargas

Para explicar el origen de las fluctuaciones obtenidas en  $V_{300}$ , para cada experimento realizado se estableció una comparación con las muestras tomadas de  $V_{AC}$ . Por simple inspección de los datos resultantes se observó una estrecha relación entre ambas variables y se demuestra cuantitativamente el cálculo del coeficiente de correlación ( $r$ ), que resultó ser de 0,946 y de 0,998 con un resistor de  $1\text{ M}\Omega$  y con el Banco *Marx* como cargas, respectivamente.

Estos coeficientes con un valor muy cercano a la unidad, demuestran la estrecha dependencia que existe entre estos voltajes. Además también ayudan a explicar que las variaciones que se aprecian en  $V_{300}$  son producto de variaciones en la RDN y no son introducidas por la propia fuente.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES DE $I_L$ PARA DIFERENTES CARGAS

Otro de los experimentos fue medir  $I_L$ , que representa la corriente que fluye por la carga  $R_L$ . Las condiciones fueron las siguientes  $V_{AC}= 110\text{ Vrms}$  de alterna, con una carga  $R_L= 1\text{ M}\Omega$  conectada entre los nodos 2 y 7 Figura 3. La corriente  $I_L$  presentó un valor promedio de 0,332 mA y una desviación estándar de 0,0022 mA. El error relativo entre el valor medio obtenido y el esperado (0,311 mA) es 6,75 %.

Por último se midió  $I_L$  pero ahora la carga  $R_L$  será el circuito Banco *Marx* que se conecta a los nodos 2 y 7 del circuito de la Figura 3. En la corriente  $I_L$  se observó un valor promedio de 0,124 mA, con una desviación estándar de 0,00603 mA. Estos resultados se muestran en la Figura 7.

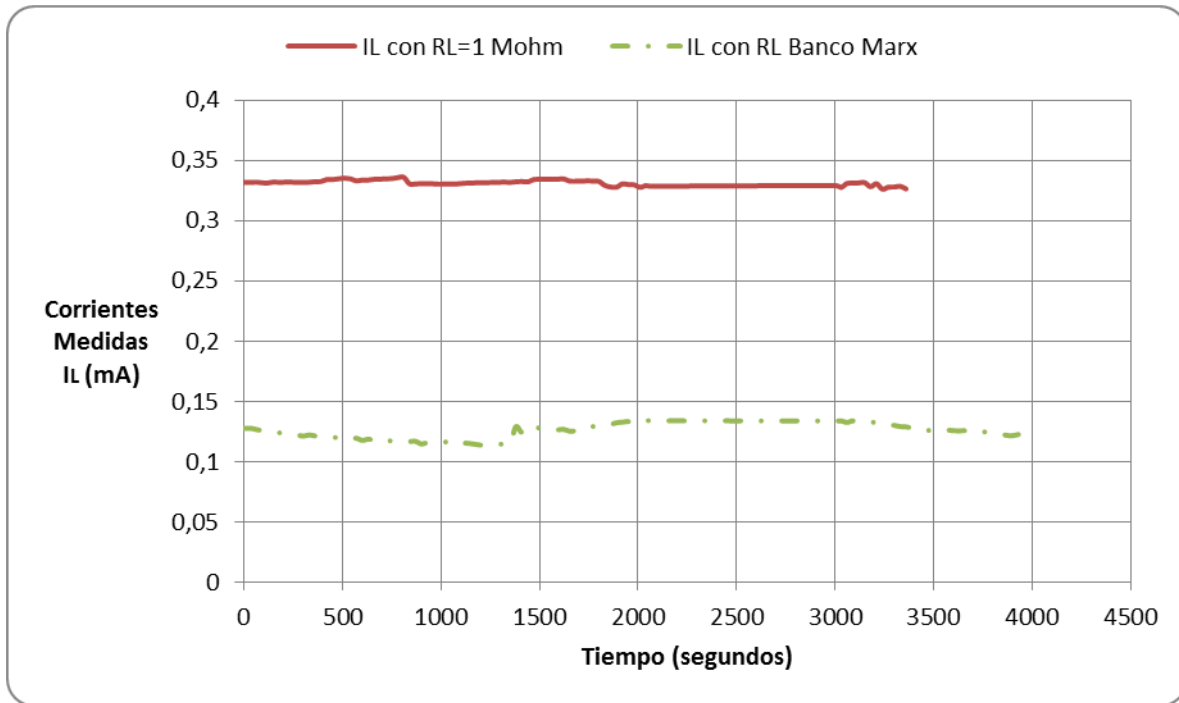


Figura 7. Comportamiento de  $I_L$  en función del tiempo, para diferentes cargas

## VOLTAJE DE RIZADO PARA DIFERENTES CARGAS

Para una carga  $R_L = \infty$  como se puede apreciar en la Figura 8, el rizado para V300 resultó menor que 1 V (exactamente 0,874 V), lo cual representa 0,28 % del valor medio obtenido para esta variable. Se comprobó que la frecuencia de la señal medida fue de aproximadamente 59 Hz, próximo a los 60 Hz, que es el valor esperado por tratarse de un rectificador de media onda. El rizado está provocado por la carga y descarga de los capacitores. Para una carga  $R_L = 1 \text{ M}\Omega$  el voltaje de rizado correspondiente a V300, fue menor que 3,5 V (exactamente 3,40 V), lo cual representa 1,02 % del valor medio (333,49 V). Finalmente para una carga  $R_L = \text{Banco Marx}$  el voltaje de rizado fue de 1,20 V, lo cual representa 0,36 % del valor medio (331,42 V).

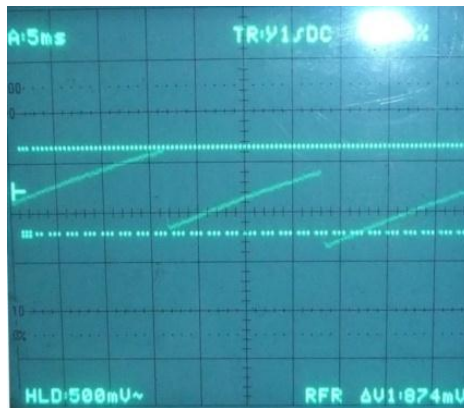


Figura 8. Amplitud del voltaje de rizado de  $V_{300}$  sin carga aplicada



## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Tabla 1 se presentan en conjunto los resultados obtenidos para  $V_{AC}$  e  $I_L$  en los tres tipos de experimentos realizados. Como se puede apreciar en la Tabla 1, el valor promedio de la fuente ( $V_{300}$ ) disminuyó ligeramente (en un 1%) cuando se le conectó una carga a ella con respecto a cuando se midió sin carga.

Por otra parte el voltaje de rizado aumentó con la presencia de una carga, según lo esperado, con respecto a su valor cuando no hay carga aplicada, ya que los capacitores se descargan más que cuando no tienen carga conectada ( $R_L = \infty$ ). También se aprecia un aumento de la corriente que pasa por la carga ( $I_L$ ), cuando existe una disminución de esta ( $R_L$ ). Se debe destacar que aunque no se midió el valor de la resistencia equivalente del Banco *Marx* entre los nodos de alimentación, se aprecia que es mayor que 1 M $\Omega$ , aspecto que se comprueba observando los valores de las corrientes en la Tabla 1. Este valor se atribuye a la resistencia propia de las uniones PN de los transistores que conforman el Banco.

Variable		$R_L = \infty$	$R_L = 1 \text{ M}\Omega$	$R_L = \text{Banco Marx}$
$V_{300} \text{ (V)}$	Valor promedio	334,88	333,49	331,42
	Desviación estándar	1,97	2,17	4,13
	Vrizado	0,874	3,40	1,20
$I_L \text{ (mA)}$	Valor promedio	0	0,332	0,124
	Desviación estándar	0	0,0022	0,00603

Tabla 1. Relación entre los datos obtenidos para cada  $V_{300}$  e  $I_L$ , en cada experimento

## CONCLUSIONES

Se mostraron las experiencias prácticas en el diseño de una fuente de alto voltaje y su aplicación en un Banco de *Marx*.

Se presentó un estudio de los aspectos teóricos de los multiplicadores de voltaje de media onda, como topología utilizada para la fuente de alimentación.

Se diseñó, simuló y fabricó una fuente de alimentación que garantiza un voltaje de salida de aproximadamente 300 V ( $V_{300}$ ) y una corriente del orden de los mA.

Se midió sin carga aplicada el voltaje  $V_{300}$ , presentando un valor promedio de 334,88 V, con un voltaje de rizado de 0,874 V, lo cual representa un 0,28 % del valor promedio. Para una resistencia de carga de 1 M $\Omega$ , un voltaje promedio de 333,49 V, con un rizado de 3,4 V, representando un 1,02 % del valor promedio y una corriente promedio de 0,332 mA.

Se comprobó la estrecha relación entre el voltaje de entrada ( $V_{ac}$ ) del multiplicador y su salida ( $V_{300}$ ), aspecto que justifica las variaciones que se producen en este último. Esta afirmación está sustentada en el cálculo del coeficiente de correlación ( $r$ ) entre  $V_{ac}$  y  $V_{300}$  el cual es de aproximadamente 99,78 %.

## REFERENCIAS

1. Lastres Capote, A., A. Nagy, and A. Torres Colón, *Monografía: El Diodo Semiconductor*. Centro de Investigaciones en Microelectrónica (CIME-ISPJAE), 2010. 2: p. 35.
2. Rai, V.N., Shukla, M., Khardekar, R K *A transistorized Marx bank circuit providing sub-nanosecond high-voltage pulses*. Measurement Science and Technology, 1994. 5(4): p. 447-449.
3. Redondo, L.M., *A DC Voltage-Multiplier Circuit Working as a High-Voltage Pulse Generator*. Plasma Science, IEEE Transactions on, 2010. 38(10): p. 2725-2729.

4. Brugler, J.S., *Theoretical Performance of Voltage Multiplier Circuits*. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1971: p. 132-135.
5. Tam, K.S. and E. Bloodworth, *Automated Topological Generation and Analysis of Voltage Multiplier Circuits*. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1990. 37(3): p. 432-436.
6. Rashid, M.H., *Circuitos Microelectrónicos, análisis y diseño*, ed. I.T. Editores. 2000, University of Florida.
7. Millman, J. and A. Grabel, *Microelectrónica*. Editorial Hispano Europea, Sexta ed. 1995.

## AUTORES

**José Enrique Eirez izquierdo**, Ingeniero en Automática, Máster en Ciencias, Centro de Investigaciones en Microelectrónica (CIME-ISPJAE), Artemisa, Cuba y correo electrónico joseenrique.ei@electrica.cujae.edu.cu.

**Fabriciano Rodríguez González**, Ingeniero Eléctrico, Doctor en Ciencias, Centro de Investigaciones en Microelectrónica (CIME-ISPJAE), La Habana, Cuba y correo electrónico fabriciano.rodriguez@electrica.cujae.edu.cu.

**Sonia Pavoni Oliver**, Ingeniero en Telecomunicaciones, Doctor en Ciencias, Centro de Investigaciones en Microelectrónica (CIME-ISPJAE), La Habana, Cuba y correo electrónico sonnia.pavoni@electrica.cujae.edu.cu.