



ANÁLISIS DE LA FUENTE CUADRADA BIPOLAR DE ALTO VOLTAJE USADA EN SISTEMAS DE DESCARGA DE BARRERA DIELECTRICA

Camilo Sanabria, Rafael Diez

**Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia**

Hubert Piquet

**Université de Toulouse
Toulouse, Francia**

David Flórez

**Universidad Sergio Arboleda
Bogotá, Colombia**

Resumen

Este trabajo presenta el análisis de una fuente de voltaje bipolar cuadrada compuesta por un puente completo y un transformador elevador, utilizada ampliamente como suministro para sistemas de descarga de barrera dieléctrica (DBD) en la generación de plasma no térmico. Primero se expone un esquema eléctrico de la fuente que incluye el comportamiento capacitivo de las descargas y elementos parásitos del transformador, para explicar el funcionamiento. Como resultado del modelo propuesto, se encontró que la inductancia de fugas del transformador tiene un rol importante para explicar el comportamiento de las formas de onda de voltaje y corriente de la DBD.

Utilizando la teoría clásica de circuitos eléctricos y el plano de fase (usado más comúnmente en el análisis de convertidores resonantes), se obtuvieron ecuaciones para características importantes en el diseño de las fuentes de alimentación para plasma, como la potencia promedio suministrada a la DBD, el voltaje pico máximo y la duración de la descarga, en función no solo del voltaje de

entrada y la frecuencia de conmutación, sino también de los algunos elementos parásitos del transformador y los parámetros del modelo eléctrico del reactor donde se produzca la DBD.

El análisis y las ecuaciones desarrolladas son una nueva contribución útil para los diseñadores de fuentes de alimentación de sistemas de plasma no térmico, que permiten evitar el sobredimensionamiento en los semiconductores y del transformador que incrementan los costos de fabricación. Finalmente se compara el modelo y las ecuaciones con algunos resultados experimentales usando una lámpara Excimer como reactor para la DBD.

Palabras clave: descarga de barrera dieléctrica; fuentes de alimentación; sistemas pulsantes de potencia

Abstract

This work presents the analysis of the bipolar square voltage source composed of a full bridge and a step-up transformer, widely used to supply dielectric barrier discharge (DBD) systems for the generation of non-thermal plasma. First, an electrical schematic of the source is shown that includes the capacitive behavior of the discharges and parasitic elements of the transformer, to explain the operation. As a result of the proposed model, it was found that the leakage inductance of the transformer has an important role to explain the behavior of the voltage and current waveforms of the DBD.

Using the electrical circuits classical theory and the state plane (commonly used in the analysis of the resonant converter), equations were developed for important characteristics in the design of plasma power supplies, such as the average power delivered to the DBD, the maximum peak voltage, and the discharge duration, as a function not only of the input voltage and the switching frequency but also of some parasitic elements of the transformer and the parameters of the electrical model of the reactor where the DBD happens.

The analysis and the equations developed are a new contribution useful for designers of power supplies of non-thermal plasma systems, that permits to avoid transformer and semiconductor oversizing that increases manufacturing costs. Finally, the model and the equations are compared with some experimental results using an Excimer lamp as a reactor for the DBD.

Keywords: dielectric barrier discharge; power supplies; pulsed power systems

1. Introducción

La descarga de barrera dieléctrica (DBD) es una forma de generar plasma no térmico que en los últimos años ha sido utilizado con éxito en aplicaciones como la generación de ozono, tratamiento de materiales, generación de luz ultravioleta y el tratamiento de gases contaminantes como los generados por los escapes de los motores diesel y componentes volátiles de procesos industriales (Kogelschatz, 2003; Müller, et al, 2007).



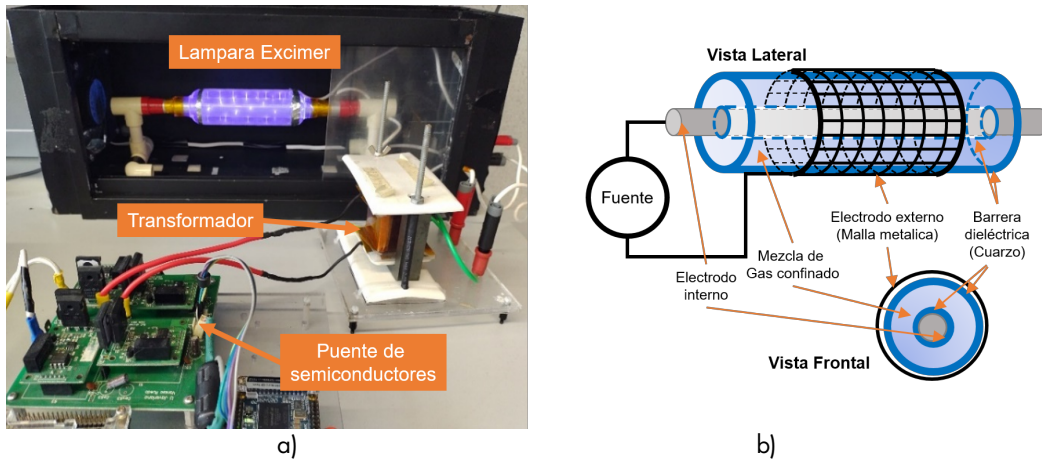


Figura 1. a) Descarga de barrera dieléctrica en lámpara Excimer. b) Estructura de una lámpara para DBD.

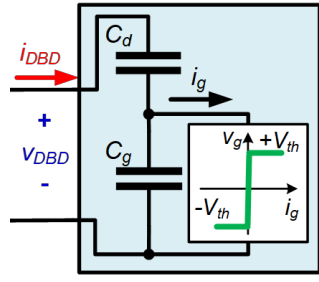
Para generar las descargas de barrera, se requieren fuentes de alimentación que permitan alcanzar voltajes en el orden de los kilovoltios entre los dieléctricos, para producir de esta manera el plasma no térmico. Estas fuentes se pueden dividir por su tipo en: fuentes de voltaje o fuentes de corriente (Florez, *et al.*, 2018; Rueda, *et al.*, 2019). Las fuentes de voltaje presentan como ventaja su sencillez en la construcción, y son ampliamente utilizadas por investigadores en plasma, las cuales se pueden categorizar de acuerdo a la forma de onda entregada a la DBD en dos grupos principales: senoidales (López-Fernández, *et al.*, 2015; Neretti, *et al.*, 2019) y pulsantes (Kolek, *et al.*, 2018; Liu, *et al.*, 2019; Panousis, *et al.*, 2009; Schitz, *et al.*, 2018).

Algunos estudios como los presentados por (Lomaev, *et al.*, 2012) y (Zhang, *et al.*, 2016) muestran que las fuentes de voltaje de pulsos cuadrados presentan mejores resultados en procesos de generación de UV y de ozono, incrementado la producción de estos entre un 20 % a 30 % respectivamente, cuando se comparan con fuentes de voltajes senoidales.

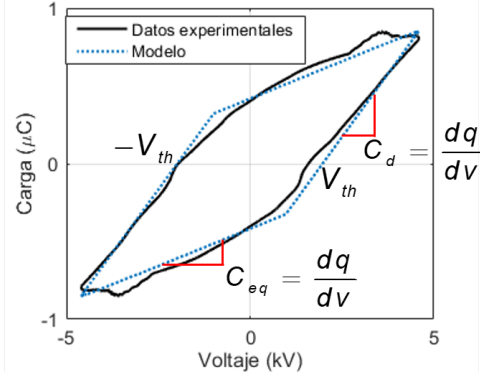
Existen diversas topologías de convertidores que son usados como fuentes de pulsos cuadrados de voltaje, muchas de las cuales consisten de un puente completo de semiconductores que produce bajo voltaje y un transformador elevador que entrega el alto voltaje requerido para la DBD (Florez, *et al.*, 2018; Jakraktok, *et al.*, 2018; Kolek, *et al.*, 2018; Schitz, *et al.*, 2018). Esta topología tiene como ventaja la posibilidad de entregar pulsos cuadrados positivos y negativos a la DBD.

En la figura 1a, se presenta una imagen de una DBD en una lámpara Excimer para la generación de radiación UV llevada a cabo en laboratorio con una fuente cuadrada bipolar conformada por un puente completo y un transformador. La figura 1b, muestra la estructura de la lámpara Excimer, donde se observa el electrodo central y un electrodo exterior conformado por una malla metálica, que están separados por dos dieléctricos de cuarzo (vidrio). Entre los dieléctricos se encuentra un gas confinado que cuando es ionizado por medio de la descarga genera radiación UV con una longitud de onda que depende del tipo de gas.





a)



b)

Figura 2. a) Modelo eléctrico simple de la DBD. b) Ejemplo de un diagrama de Manley utilizado para identificación de parámetros.

Aunque la fuente presentada en la figura 1 es muy utilizada para la generación de DBD, no se encuentra en la literatura ecuaciones que permitan al diseñador de convertidores para aplicaciones de plasma dimensionar adecuadamente el transformador y los semiconductores, lo que normalmente origina sobredimensionamiento de estos componentes. De igual manera, la DBD es una carga que tiene un comportamiento capacitivo no lineal, lo que origina que los investigadores que la utilizan en procesos de plasma, no tengan una ecuación para determinar el voltaje y frecuencia necesarias para obtener una potencia determinada en el proceso, y deben utilizar métodos experimentales de ajuste.

En este trabajo se presenta un modelo eléctrico para la fuente de voltaje bipolar que tiene en consideración el comportamiento de la DBD y los elementos parásitos del transformador, para explicar su funcionamiento. Usando este modelo se encontró un conjunto de circuitos lineales, con los cuales se determinan ecuaciones para la potencia promedio entregada a la DBD, el máximo voltaje pico y la duración de las descargas. Finalmente se presentan resultados experimentales que validan las ecuaciones desarrolladas.

2. Modelo de la fuente cuadrada bipolar de voltaje

El comportamiento eléctrico de la DBD se modela utilizando el esquema de la figura 2a, que es ampliamente usado en trabajos como (Bonnin *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2016). Cuando no existe descarga, la DBD se modela como dos capacitores en serie, una capacitancia equivalente del dieléctrico C_d , y otra del gas C_g ; en este estado la corriente del gas i_g es igual a cero. A medida que el voltaje aplicado a la DBD (V_{DBD}) se incrementa, se alcanza un voltaje de ruptura en el gas denominado V_{th} , momento en el cual comienza la descarga. Durante la descarga el voltaje del gas es aproximadamente constante e igual a $\pm V_{th}$ (la polaridad depende de la dirección de flujo de la corriente), cambiándose el circuito por la combinación en serie de la capacitancia C_d y una fuente de voltaje constante. La corriente i_g cuando la descarga está presente es igual a la corriente de entrada de la DBD (i_{DBD}).



Los parámetros del modelo eléctrico C_d , C_g , V_{th} , dependen de factores como la geometría de la lámpara, el tipo de gas y de la presión del mismo, y son calculados utilizando el Diagrama de Manley como en (Neretti, *et al.*, 2019; Wang, *et al.*, 2016). El diagrama de Manley es una curva experimental de carga versus voltaje de la DBD, donde a través de las pendientes es posible identificar el valor de los parámetros del modelo. En la figura 2b se observa un ejemplo de un diagrama de Manley de una lámpara Excimer y la comparación de este con el modelo, donde C_{eq} es el valor de las capacitancias C_d y C_g en serie.

Para completar un esquema eléctrico o modelo de la fuente, se incluye un modelo del transformador elevador como el presentado en (Florez, *et al.*, 2013), pero se ha ignorado la inductancia de magnetización del transformador, ya que esta no afecta el funcionamiento de la fuente.

La figura 3 muestra el modelo eléctrico propuesto para la fuente cuadrada bipolar de voltaje. Como elementos importantes para explicar el comportamiento experimental observado de la fuente, se han considerado la inductancia de fuga del transformador L_k (observada en el lado primario de este), la capacitancia parasita del transformador C_p (observada en el lado secundario, permitiendo agregar el valor de la capacitancia de entrada de las puntas de voltaje que esta normalmente en el orden de pico faradios para mejorar la precisión de los cálculos) y una resistencia de pérdidas R_p que representa la resistencias de los devanados del transformador y las pérdidas en el puente completo.

La secuencia de conmutación de los interruptores del puente de la fuente en un periodo de conmutación es la siguiente:

1. S1-S4 cerrados, S2-S3 abiertos. Se aplica V_{DC} a los terminales del transformador, produciendo el pulso positivo.
2. S2-S4 cerrados, S1-S3 abiertos. Se pone en corto los terminales del transformador, forzando un voltaje igual a cero.
3. S2-S3 cerrados, S1-S4 abiertos. Se aplica $-V_{DC}$ a los terminales del transformador, produciendo el pulso negativo.
4. S1-S3 cerrados, S2-S4 abiertos. Se pone en corto los terminales del transformador, forzando un voltaje igual a cero.



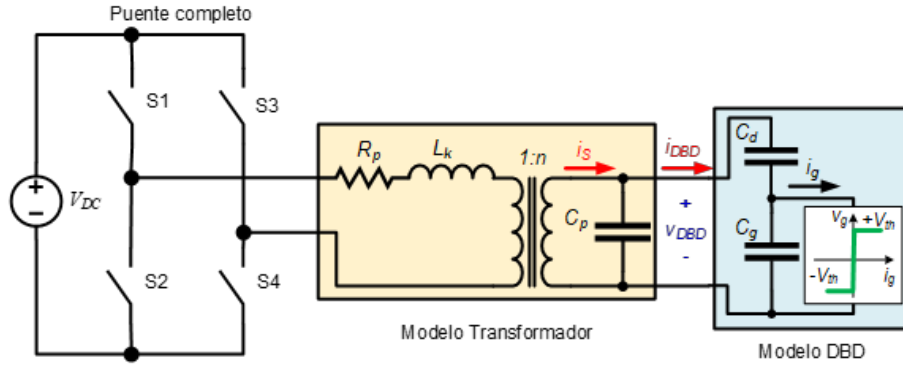


Figura 3. Modelo eléctrico para la fuente de voltaje bipolar

Debido a los componentes parásitos del transformador y el comportamiento capacitivo de la DBD, el voltaje que se observa experimentalmente en los terminales del reactor no corresponde a una señal cuadrada (como se podría esperar de la configuración de puente completo), presentándose un comportamiento oscilatorio como lo muestran (Florez, *et al.*, 2018; Jakraktok, *et al.*, 2018). Tomando como base los datos reportados en el artículo de (Florez, *et al.*, 2018) resumidos aquí en la tabla 1, se realizó una simulación en el software LTSPICE para verificar el esquema propuesto en la figura 3 y validar este con gráficas experimentales para el voltaje y la corriente de la DBD. La figura 4 muestra los resultados de simulación, donde se ha agregado la corriente del gas, debido a que esta tiene un valor diferente de cero cuando las descargas ocurren, y permite calcular la duración de estas en simulación (en forma experimental no es posible medir esta corriente).

Tabla 1. Parámetros de simulación en LTSPICE, obtenidos de (Florez, *et al.*, 2018)

Parámetro	Valor
Voltaje de entrada V_{DC}	414 V
Inductancia de fugas L_k	1.5 μ H
Relación de vueltas del transformador n	10
Resistencia de pérdidas R_p	6 Ω
Frecuencia de conmutación f_s	60 kHz
Duración del pulso de voltaje positivo t_p	1.5 μ s
Capacitancia del dieléctrico C_d	80 pF
Capacitancia del gas C_g	30 pF
Voltaje de ruptura V_{th}	1350 V

3. Subintervalos de operación de la fuente

La figura 4a muestra un periodo completo de la corriente y voltaje de la DBD, donde se puede apreciar la simetría que se presenta entre el pulso positivo de voltaje y el negativo. Este hecho, permite centrar en análisis en el pulso positivo de voltaje, el cual se presenta en detalle en la figura 4b. En la fuente de voltaje bipolar ocurren cuatro descargas durante los flancos ascendentes y descendientes de los pulsos de voltaje. El comportamiento oscilatorio es consecuencia de la



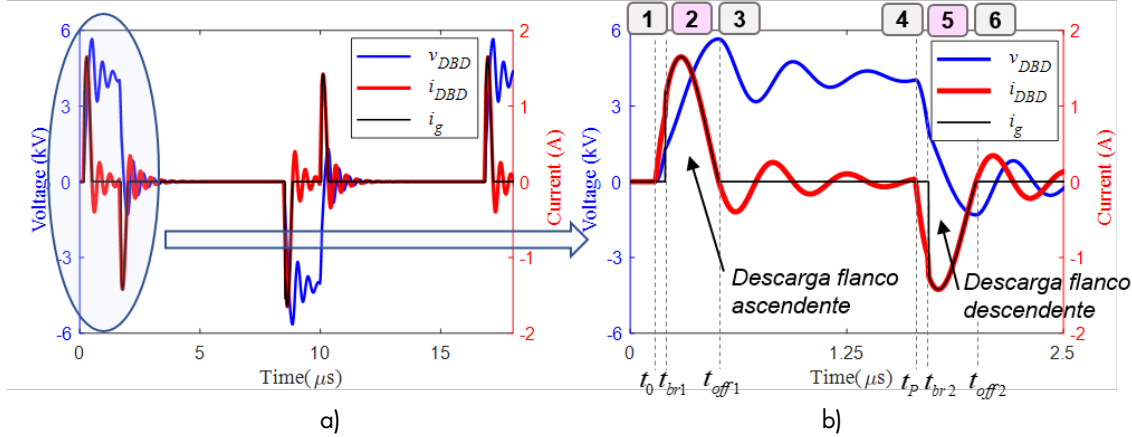


Figura 4. a) Formas de onda de v_{DBD} y i_{DBD} , tomando como base lo reportado en (Florez, et al., 2018); b) Detalle del pulso de voltaje positivo.

interacción de las capacitancias equivalentes de la DBD, la inductancia de fugas del transformador y las pérdidas existentes en el circuito.

El pulso positivo de voltaje se puede dividir en seis subintervalos:

1. En este subintervalo se incrementa el voltaje y la corriente en la DBD cuando se cierran los interruptores S1 y S4, y finaliza cuando el voltaje en el gas alcanza el valor de ruptura V_{th} .
2. En el subintervalo 2 se produce la descarga en el flanco ascendente del voltaje, manteniéndose constante el voltaje en el gas. La descarga termina cuando el pulso de corriente llega a ser igual a cero, ($i_{DBD} = i_g$).
3. Durante este subintervalo no hay descarga y finaliza cuando se abren los interruptores S1 y S4 y se cierran los interruptores S2 y S4 de la figura 3, cuando se cumple con la duración del pulso de voltaje t_p .
4. Una vez cortocircuitado el primario del transformador con los interruptores S2 y S4 se inicia a reducir el voltaje en la DBD y cambia de sentido la corriente. Este subintervalo finaliza cuando se alcanza el valor $-V_{th}$ en el gas.
5. En este subintervalo ocurre la descarga del flanco descendente de voltaje y finaliza cuando el pulso de corriente de la DBD cruza por cero.
6. Este subintervalo corresponde al momento después de la segunda descarga y el momento cuando se cierran los interruptores S2 y S3 y se abren S1 y S4 para producir el pulso de voltaje negativo.

4. Análisis del convertidor

La figura 5 muestra los circuitos equivalentes que se obtienen cuando se toma el modelo eléctrico de la figura 3 y se reduce considerando los seis intervalos descritos en la sección anterior. Los circuitos se obtienen trasladando los elementos al secundario del transformador elevador y modelando la DBD como se explica en la sección 2.



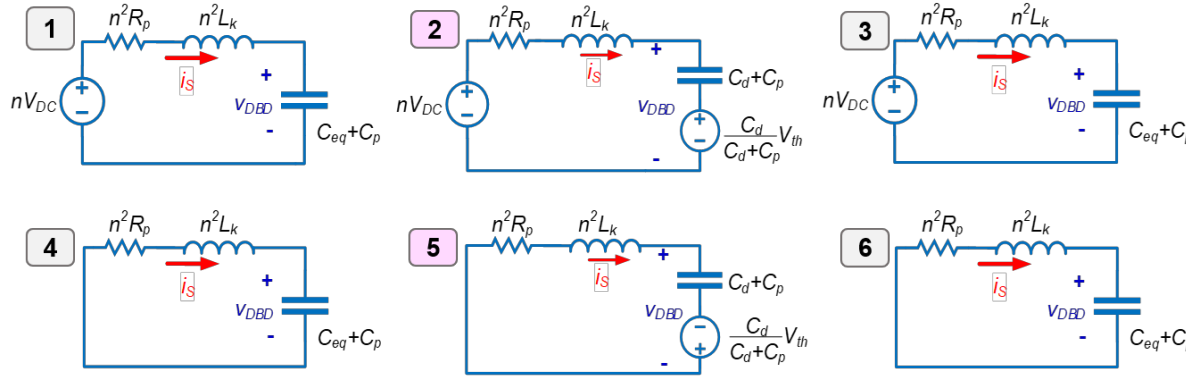


Figura 5. Circuitos equivalentes de los subintervalos presentado en la figura 4.

La potencia promedio entregada a la DBD (P_{DBD}) se calcula con la ecuación (1), en donde los limites de la integral corresponde a la duración de los subintervalos 2 y 5 de la figura 4b. Considerando el modelo de la DBD la expresión en (1) se convierte en la ecuación (2).

$$P_{DBD} = 2f_s \left[V_{th} \int_{t_{br1}}^{t_{off1}} i_{DBD}(t) dt - V_{th} \int_{t_{br2}}^{t_{off2}} i_{DBD}(t) dt \right] \quad (1)$$

$$P_{DBD} = 2f_s n V_{DC} V_{th} C_d [(V_P - V_{1f}) - (V_{NP} - V_{4f})] \quad (2)$$

Donde V_P es el voltaje pico de la DBD del pulso positivo de voltaje que ocurre al final del subintervalo 2, V_{NP} es el voltaje mínimo de la DBD en el pulso positivo de voltaje que sucede al final del subintervalo 5, V_{1f} y V_{4f} son los voltajes al final de los subintervalos 1 y 4 respectivamente.

V_P se obtiene analizando el circuito del subintervalo 2, con métodos clásico de circuitos:

$$V_P = nV_{DC} + \left[\frac{I_{1f}}{\omega_{d2}(C_d + C_p)} \sin(\omega_{d2}t_{d1}) - (nV_{DC} - V_{1f}) \frac{\omega_{n2}}{\omega_{d2}} \sin \left(\omega_{d2}t_{d1} + \cos^{-1} \left(\frac{n^2 R_p}{2} \sqrt{\frac{C_d + C_p}{n^2 L_k}} \right) \right) \right] e^{-\frac{R_p t_{d1}}{2L_k}} \quad (3)$$

Siendo ω_{n2} y ω_{d2} las frecuencias de resonancia y amortiguada del circuito del subintervalo 2 respectivamente, I_{1f} la corriente inicial en el subintervalo 2 (corriente final del subintervalo 1) y t_{d1} la duración de la descarga del flanco ascendente. Para simplificar la solución de la ecuación anterior, se utiliza el plano de fase para determinar la duración de la descarga como se explica en (Chéron, 1989):

$$t_{d1} = \sqrt{n^2 L_k (C_d + C_p)} \left(\pi - \tan^{-1} \left(\frac{I_{1f}}{nV_{in} - V_{1f}} \sqrt{\frac{n^2 L_k}{C_d + C_p}} \right) \right) \quad (4)$$



De forma similar es posible encontrar la solución para cada subintervalo, utilizando el plano de fase para determinar la duración de los subintervalos y métodos de análisis clásicos de circuitos para la expresión de la corriente y voltaje del intervalo. El conjunto completo de ecuaciones se presenta en el artículo de (Sanabria, *et al.*, 2021) que está sometido a revisión en el momento de escritura de este artículo. Cabe anotar que existe las dos ecuaciones para cada subintervalo, y para determinar el estado estable de la fuente, es necesario resolver todo el conjunto de ecuaciones.

5. Resultados

Para validar el esquema eléctrico propuesto para la fuente de voltaje y las ecuaciones expuestas en las secciones anteriores, se llevaron a cabo varios experimentos usando una lampara Excimer cuyos parámetros estimados usando el diagrama de Manley son: $C_d = 107.4 \text{ pF}$, $C_g = 26 \text{ pF}$, $V_{th} = 2352 \text{ V}$. Se uso un transformador con núcleo E con una relación de vueltas $n = 10$, y una inductancia de fugas $L_k = 10.1 \text{ } \mu\text{H}$. La resistencia de perdidas R_p y la capacitancia parasita C_p se estimaron en $4 \text{ } \Omega$ y 12 pF respectivamente. La capacitancia parasita se estimó sumando el valor de la capacitancia parasita del transformador más la capacitancia de la punta de voltaje que se usó en la medición. Como semiconductor se utilizó el Mosfet C2M0160120D. El voltaje de entrada V_{DC} se ajustó en 340 V y la frecuencia de conmutación f_s se cambió de 30 kHz a 50 kHz , ajustando la duración de los pulsos de voltaje t_p para tener un 50% de ciclo útil en todas las pruebas. En la figura 6 se muestra las formas de onda experimentales para el voltaje (azul) y corriente (rojo) de la DBD, y las simuladas en LTSPICE para dos valores de f_s . En la tabla 2, se presenta un resumen de los valores numéricos para la potencia de entregada a la DBD, el voltaje pico positivo y la duración de la descarga del flanco ascendente de voltaje para los resultados de la figura 6.

Tabla 1. Comparación de los resultados experimentales y teóricos

$f_s \text{ (kHz)}$		$P_{DBD} \text{ (W)}$	$V_P \text{ (kV)}$	$t_{d1} \text{ (ns)}$
30	Teórico	72,60	5,30	648
	Experimental	72,40	5,37	620
	Error (%)	-0,28	1,30	-4,52
40	Teórico	95,20	5,32	648
	Experimental	94,90	5,36	654
	Error (%)	-0,32	0,75	0,92



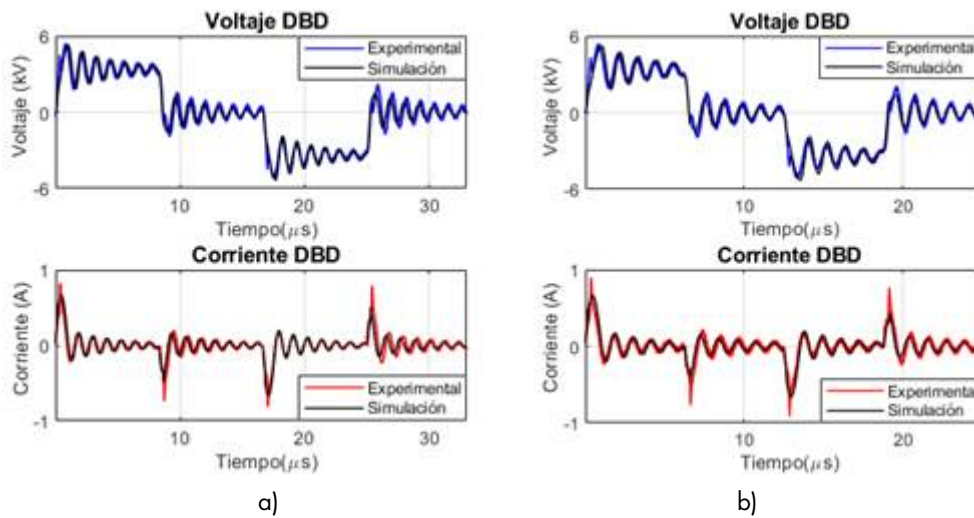


Figura 6. Comparación formas de onda experimental y de simulación para descargas en una lámpara Excimer.
a) $f_s = 30$ kHz; b) $f_s = 40$ kHz.

6. Conclusiones

Se presenta un modelo eléctrico de la fuente de voltaje bipolar cuadrada para sistemas de plasma no térmico, es cual se validó mediante simulación y pruebas experimentales, determinando que el comportamiento de la fuente depende de elementos parásitos del transformador elevador como la inductancia de fugas y los parámetros eléctricos del reactor donde se realice la descarga.

Se encontraron ecuaciones para determinar parámetros como la potencia promedio entregada a la DBD, usando teoría clásica de circuitos y el plano de fase que permiten conocer a priori los valores teóricos y al ser comparados con datos experimentales tienen un error menor al 5 %.

7. Referencias

- Bonnin, X., Brandelero, J., Videau, N., Piquet, H., and Meynard, T. (2014). A high voltage high frequency resonant inverter for supplying DBD devices with short discharge current pulses. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(8), pp.4261–4269.
- Chéron, Y. (1989). *La commutation douce dans la conversion statique de l'énergie électrique*. Technique et documentation Lavoisier.
- Florez, D., Bonnin, X., Diez, R., and Piquet, H. (2013). IMPACT OF THE TRANSFORMER IN THE CURRENT MODE SUPPLY OF DIELECTRIC. *2013 Brazilian Power Electronics Conference*, pp.1171–1176.
- Florez, D., Schitz, D., Piquet, H., and Diez, R. (2018). Efficiency of an Exciplex DBD Lamp Excited Under Different Methods. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 46(1), pp.140–147.
- Jakraktok, I., and Dechthummarong, C. (2018). Effect of High Voltage Switching Frequency on DBD Plasma in Air for PET Surface Modification. *IEECON 2018 - 6th International Electrical Engineering Congress*, 2018–2021.



- Kogelschatz, U. (2003). Dielectric-barrier discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 23(1), pp. 1–46.
- Kolek, J., Kalisiak, S., and Holub, M. (2018). Resonant, high voltage power supply for non-thermal plasma reactors. *2018 14th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics, WZEE 2018*.
- Liu, Y., Fan, R., Zhang, X., Tu, Z., and Zhang, J. (2019). Bipolar high voltage pulse generator without H-bridge based on cascade of positive and negative Marx generators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 26(2), pp. 476–483.
- Lomaev, M. I., Sosnin, E. A., and Tarasenko, V. F. (2012). Excilamps and their applications. *Progress in Quantum Electronics*, 36(1), pp. 51–97.
- López-Fernández, J. A., Peña-Eguiluz, R., López-Callejas, R., Mercado-Cabrera, A., Jaramillo-Sierra, B., Rodríguez-Mendez, B., Valencia-Alvarado, R., and Muñoz-Castro, A. E. (2015). A 10- to 30-kHz Adjustable Frequency Resonant Full-Bridge Multicell Power Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(4), pp. 2215–2223.
- Müller, S., and Zahn, R. J. (2007). Air pollution control by non-thermal plasma. *Contributions to Plasma Physics*, 47(7), pp. 520–529.
- Neretti, G., and Ricco, M. (2019). Self-tuning high-voltage and high-frequency sinusoidal power supply for dielectric barrier discharge plasma generation. *Electronics (Switzerland)*, 8(10), 1–14.
- Panousis, E., Merbahi, N., Clément, F., Yousfi, M., Loiseau, J. F., Eichwald, O., and Held, B. (2009). Analysis of dielectric barrier discharges under unipolar and bipolar pulsed excitation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 16(3), pp. 734–741.
- Rueda, V., Wiesner, A., Diez, R., and Piquet, H. (2019). Power Estimation of a Current Supplied DBD Considering the Transformer Parasitic Elements. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(1), pp. 1–1.
- Sanabria, C., Piquet, H., Florez, D., Diez, R. Sizing Equations for a Square Voltage Power Supply for Dielectric Barrier Discharges. Sometido en el 2021 a *IEEE Transactions on power electronics*.
- Schitz, D., Ivankov, A., and Pismennyi, V. (2018). Nonthermal Plasma Jet for Biomedical Applications. *KnE Energy*, 3(2), pp. 456.
- Wang, L., Tang, X., Luan, S., and Chen, S. (2016). Comparison and analysis of DBD-ozonizers powered by current-and voltage-mode power supplies. *2015 6th International Conference on Power Electronics Systems and Applications: Electric Transportation - Automotive, Vessel and Aircraft, PESA 2015*, pp. 4–8.
- Zhang, X., Lee, B. J., Im, H. G., and Cha, M. S. (2016). Ozone Production with Dielectric Barrier Discharge: Effects of Power Source and Humidity. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44(10), pp. 2288–2296.

Sobre los autores

- **Camilo Sanabria:** Ingeniero Electrónico, Magister en Ingeniería Electrónica, Estudiante del doctorado de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana y profesor catedrático de la escuela de ingeniería electrónica de la UPTC Sede Sogamoso. camilo.sanabria@javeriana.edu.co, camilo.sanabria@uptc.edu.co.
- **Rafel Diez:** Ingeniero Electrónico, Magister y Doctor de la Universidad de Toulouse. Profesor asistente en el departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. rdiez@javeriana.edu.co.
- **Hubert Piquet:** Físico, Doctor en Ingeniería Eléctrica del Instituto Nacional Politécnico de Toulouse. Profesor titular de la Universidad de Toulouse e investigador del “Laboratoire Plasma et Conversion d’Energie”. piquet@laplace.univ-tlse.fr.



- **David Flórez:** Ingeniero Electrónico, Magister in sistemas y redes críticos, Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Javeriana y del Instituto Nacional Politécnico de Toulouse. Profesor e investigador de la escuela de Ciencias Exactas e Ingeniería de la Universidad Sergio Arboleda. david.florez@usa.edu.co.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2021 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

