

# Fuente de alto voltaje para generación de plasma en un reactor cilíndrico a temperatura ambiente y a presión atmosférica

High voltage source for plasma generation in a cylindrical reactor at ambient temperature and at atmospheric pressure

*Arturo Tepale-Cortés<sup>1\*</sup>*  
*Hilda Moreno-Saavedra<sup>1</sup>*  
*Carlos Eduardo Torres-Reyes<sup>1</sup>*  
*Celso Hernández-Tenorio<sup>1</sup>*

## RESUMEN

En este trabajo se construye una fuente de alto voltaje utilizando convertidores conmutados elevadores en cascada y circuitos resonantes inductivos-capacitivos para producir plasma artificial a temperatura ambiente y presión atmosférica. Para generar el plasma se producen descargas eléctricas con la técnica Descarga de Barrera Dieléctrica DBD, que aprovecha la propiedad de los aislantes de almacenar carga electrostática. Actualmente, el plasma generado a temperatura ambiente y presión atmosférica tiene múltiples aplicaciones, entre ellas el tratamiento de gases contaminantes.

**Palabras clave:** Plasma, DBD, boost, resonante, HV.

## ABSTRACT

In this paper a high voltage source is constructed, using cascaded elevating switched converters and inductive-capacitive resonant circuits, to produce artificial plasma at room temperature and at atmospheric pressure. To generate the plasma, electric discharges are produced with the DBD technique, Dielectric Barrier Discharge, which takes advantage of the property of the insulation to store electrostatic charge. Today the plasma generated at ambient temperature and atmospheric pressure has several applications, including the treatment of pollutant gases.

**Keywords:** Plasma, DBD, Boost, Resonant, HV-high voltage

---

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Toluca.

\* Correo de contacto: [artecortes2010@hotmail.com](mailto:artecortes2010@hotmail.com)

## INTRODUCCIÓN

La tecnología basada en plasma artificial se ha utilizado en procesos industriales que buscan reducir contaminación y residuos tóxicos generados, procurando que sean baratos y alcancen una eficiencia aceptable (Mollah, 2000 y Bardos, 2010), como sucede en el tratamiento de gases contaminantes:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$ , entre otros (Kacprzyk, 2008 y Taghvaei, 2014).

El plasma es un gas ionizado que presenta átomos y moléculas cargadas tanto negativa como positivamente (Fridman, 2008); puede ser definido como un sistema de partículas en forma de un fluido conformado por una mezcla de electrones libres, iones, radicales, especies excitadas y partículas neutras (Chabert, 2011). Los plasmas se pueden producir por métodos eléctricos y éstos permiten su formación a presión atmosférica mediante la utilización de descargas que tienen una duración entre 10<sup>-6</sup> s y 10<sup>-9</sup> s; los métodos por descargas eléctricas consisten en aplicar alto voltaje entre 2 electrodos metálicos colocados dentro de un tubo que contiene gas, éstos se clasifican en: descargas de corriente continua, en radiofrecuencia, por microondas y por pulsos eléctricos (Fridman, 2008 y Dietz, 2001). Una de las técnicas más utilizadas es la Descarga de Barrera Dieléctrica (DBD), en ésta por lo menos uno de los electrodos se cubre de un material dieléctrico, lo que permite descargas a menor voltaje comparado con otras técnicas (Kogelschatz, 2003 y Quiroz 2013).

Las fuentes de alto voltaje o HV (High Voltage) facilitan la generación de plasma artificial por descargas eléctricas en C. D. o en C.A., debido a que proporcionan potencia suficiente para ionizar al gas que sirve como atmósfera (Eirez, 2013 y López, 2011). En este trabajo se presenta la construcción de una fuente poco compleja y fácil de instalar en laboratorios (Fujita, 1999a y Fujita, 1999b) para producir plasma a presión atmosférica y a temperatura ambiente mediante la técnica DBD para su posterior uso en el tratamiento de gases (Czapka, 2011).

## DESARROLLO

La fuente para la ignición de plasma se desarrolla en múltiples etapas de conversión entre C.D. y C.A. (Torres, 2013) para obtener voltajes de salida superior a 1 kV con una frecuencia de operación variable de 40 a 120 kHz. El diagrama general de la fuente HV se muestra en la Figura 1.

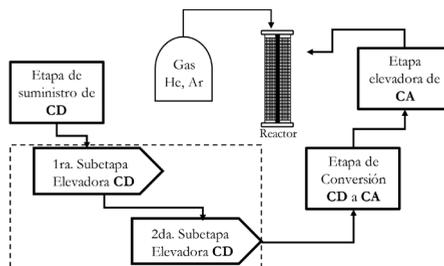


Figura 1. Etapas de la fuente de alto voltaje.  
Fuente: elaboración propia.

Para la etapa inicial de c.d. (Figura 1) se requiere una fuente que provea voltaje constante (se utiliza una batería recargable de 15 V); En las etapas elevadoras de voltaje de c.d. se debe alcanzar un valor mayor de 100 V para alimentar a la etapa de conversión de c.d. a c.a. Durante estas etapas se usa el convertidor elevador tipo Boost, cuya configuración se muestra en la Figura 2. Se utilizan diodos rectificadores de potencia MR506 o similar, transistores MOSFET de potencia IRFP640 e inductores toroides que toleran frecuencias mayores a 1 KHZ.

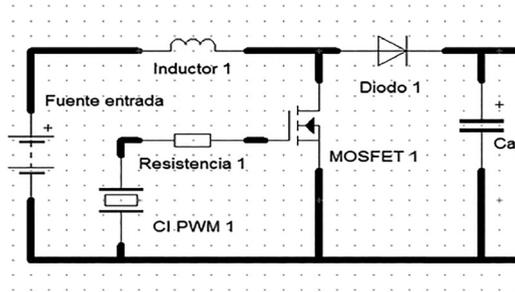


Figura 2. Fuente conmutada elevadora tipo Boost.  
Fuente: elaboración propia.

Las subetapas elevadoras 1 y 2 forman un circuito en cascada (Raizer, 1991), donde la relación de amplificación del voltaje de cada etapa depende del ciclo de trabajo al cual se somete el elemento de conmutación, en este caso el transistor Mosfet. El control del ciclo de trabajo se describe por la siguiente ecuación (1).

$$D = 1 - \frac{V_E}{V_S} \quad (1)$$

Donde  $D$  es el ciclo de trabajo,  $V_E$  el voltaje de la batería y  $V_S$  el voltaje a la salida de cada convertidor.

El ciclo de trabajo se controla con un circuito integrado, PWM-TL494, para facilitar la conexión entre terminales de circuito integrado con los transistores. El diagrama general de los convertidores Boost en cascada se observa en la Figura 3.

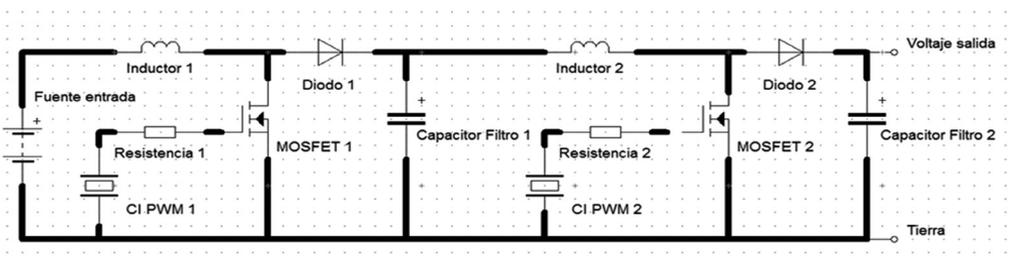


Figura 3. Convertidor conmutado en cascada.  
Fuente: elaboración propia.

Las ecuaciones que determinan la relación de voltaje en el convertidor están en función del voltaje de entrada y del ciclo de trabajo de cada subetapa, esta relación se describe por las ecuaciones 2 y 3.

$$V_{S_1} = \frac{V_E}{1 - D_1} \quad (2)$$

$$V_{S_2} = \frac{V_E}{(1 - D_2)(1 - D_1)} \quad (3)$$

Donde,  $V_{S_1}$  y  $V_{S_2}$  representan el voltaje de salida de las subetapas 1 y 2, respectivamente.

La corriente en cada subetapa está en función de la corriente de salida  $I_{S_1}$ , de la corriente de la bobina  $I_{L_1}$  y de los ciclos de trabajo de cada subetapa, esto se expresa en las ecuaciones 4 y 5.

$$I_{L_1} = \frac{I_{S_1}}{1 - D_1} \quad (4)$$

$$I_{L_2} = \frac{I_{S_2}}{1 - D_2} \quad (5)$$

Donde,  $I_{L_1}$  y  $I_{L_2}$  representan la corriente de cada bobina de las subetapas 1 y 2, respectivamente.

La etapa de conversión de voltaje de C.D. a C.A. (Figura 1) se realiza por medio de un inversor de puente completo de transistores MOSFET de potencia IRFP640, proporcionando una salida de voltaje alterno cuadrado, el control de los pulsos se realiza con los circuitos integrados PWM-TL494 y un circuito integrado driver de conmutación superior e inferior IR2110. El diagrama del inversor se muestra en la Figura 4.

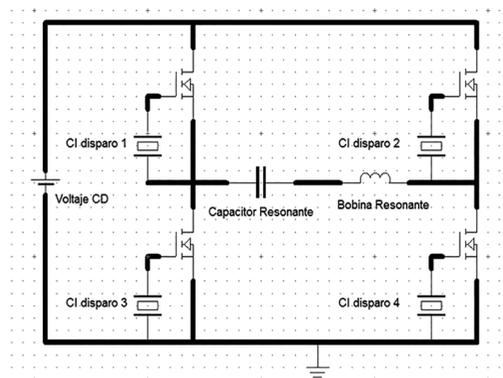


Figura 4. Inversor puente completo  
Fuente. elaboración propia.

La frecuencia a la que trabaja el inversor se puede ajustar con la ecuación 6.

$$f_{(gp)} = \frac{1}{T} = \frac{k}{RC} \quad (6)$$

Donde  $f_{(gp)}$  es la frecuencia del generador de pulsos del PWM,  $T$  el periodo de trabajo del inversor,  $R$  la resistencia,  $C$  la capacitancia para generar el tren de pulsos y  $k$  es una constante que depende de la matrícula del CI-PWM.

A la salida de la etapa de conversión de C.D. a C.A. se acopla un circuito resonante inductivo-capacitivo para proporcionar al voltaje del inversor una forma sinusoidal, Figura 5. El elemento inductivo utilizado es un transformador elevador tipo Flyback y el elemento capacitivo es un banco de capacitores; el primero conforma a la etapa elevadora de voltaje de C.A. que también funciona como aislamiento eléctrico entre el reactor y la fuente.

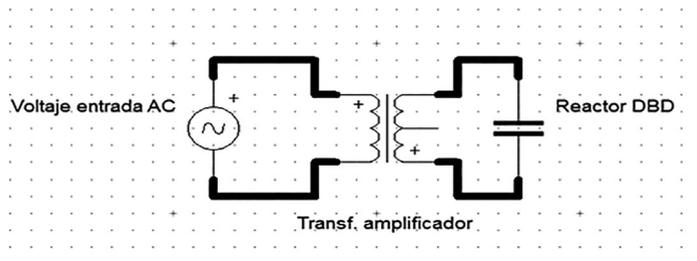


Figura 5. Circuito resonante inductivo-capacitivo  
Fuente: elaboración propia.

La frecuencia de resonancia del circuito inductivo-capacitivo se calcula con la siguiente ecuación (2).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Donde  $f$  es la frecuencia de resonancia,  $L$  el valor de inductancia y  $C$  el valor de capacitancia del circuito resonante.

El voltaje de salida proporcionado por la fuente de alto voltaje debe superar el voltaje de rompimiento del gas Argón, que a presión atmosférica es aproximadamente de 1 kv (Raizer, 1991). Alcanzado el voltaje de rompimiento se aplica a los electrodos del reactor donde se genera el plasma. Para producir el plasma se utiliza la técnica DBD, donde el reactor es un cilindro de vidrio Pyrex, material utilizado en laboratorios por su resistencia al calor y su costo accesible, el electrodo interno es una varilla de acero y el electrodo externo es una malla metálica. El esquema general se presenta en la Figura 6.

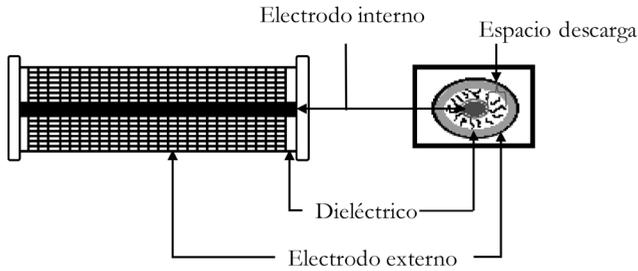


Figura 6. Reactor cilíndrico DBD.  
Fuente: elaboración propia.

## RESULTADOS

El primer convertidor Boost se trabaja con un ancho de pulso de 66% a 73% para alcanzar un voltaje de 45 V y el segundo se ajusta de 55% a 60% para obtener voltaje mayor de 100 V. En esta etapa de conversión se utilizan capacitores electrolíticos con valores de 1000  $\mu\text{F}$  y 2200  $\mu\text{F}$ , mismos que soporten valores de voltaje mayores a 100 V.

Para obtener un rango de frecuencia de trabajo del reactor de 40 a 120 kHz se utiliza un banco de capacitores de un rango de 1nF a 100 nF, para tolerar voltajes mayores a 1 kv. Al aplicar el voltaje de salida del transformador a los electrodos del reactor, en atmósfera de Argón, la descarga eléctrica producida bajo estas condiciones se observa en la Figura 7. Se logró la formación de plasma a presión atmosférica y a temperatura ambiente de 25 °C, la cual fue medida mediante un termómetro de un multímetro Steren.

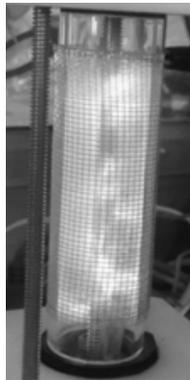


Figura 7. Reactor de plasma en atmósfera de Argón.  
Fuente: elaboración propia.

Para medir el voltaje a la salida del transformador elevador de la fuente HV se utiliza un osciloscopio Tektronics TBS-1102B-EDU, acoplado a una punta de alto voltaje Tektronics PG015A. En la Figura 8 se muestran las señales de voltaje y corriente de salida obtenidas durante la formación de plasma.

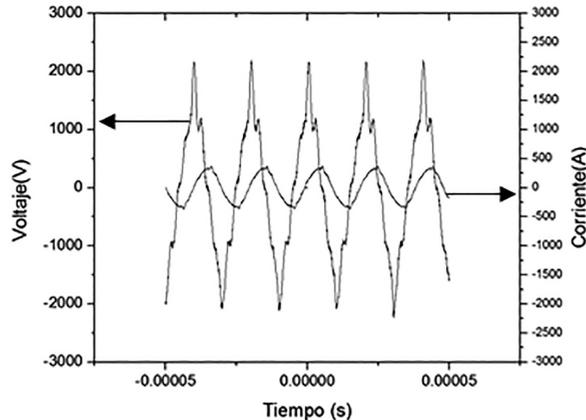


Figura 8. Señal de voltaje de salida de la fuente HV.  
Fuente: elaboración propia.

El voltaje obtenido a la salida de la fuente HV (Figura 8) se aproxima a la forma sinusoidal debido a la frecuencia de resonancia del circuito inductivo-capacitivo. De esta forma, la fuente funciona como generador de pulsos alternos para su posterior aplicación en el tratamiento de contaminantes gaseosos.

Al producirse las descargas eléctricas en el reactor, éste funciona como carga capacitiva debido a las características dieléctricas del vidrio Pyrex. Considerando una frecuencia de operación de 50 KHZ, la señal de corriente en el reactor al conectar el voltaje de salida de la fuente HV tiene un valor máximo aproximado de 400 mA (ver Figura 8).

Al graficar las señales de voltaje y corriente de salida de la fuente HV se observa un ligero desfase entre ambas variables debido a que la impedancia total del circuito RLC, formado por la reactancia inductiva y resistencia intrínseca de la bobina del secundario del transformador y la reactancia capacitiva del reactor no son exactos a los valores calculados, debido a que los dispositivos no son ideales. La corriente no presenta deformación significativa, pero es afectada por ruido eléctrico ambiental durante la formación de las descargas eléctricas.

## CONCLUSIONES

En la construcción de la fuente HV con etapas sucesivas de elevación de voltaje de CD y CA, aprovechando las ventajas del convertidor Boost en cascada y del circuito resonante inductivo-capacitivo, se alcanzan voltajes mayores a 1 kV. Se logra la formación de plasma a partir de gas He

y Ar a temperatura ambiente y a presión atmosférica, en un reactor DBD de 60 mm de diámetro. Se puede introducir un émbolo dentro del reactor para modificar el volumen del reactor. Este tipo de plasma será utilizado en el tratamiento de gases contaminantes.

El voltaje de salida del inversor es cuadrado, por lo que es necesario que tenga una forma sinusoidal para una mayor eficiencia del transformador en la etapa de conversión de CA a CA y así evitar ruido que afecte el proceso de descargas. Con el circuito resonante inductivo-capacitivo se logra este propósito.

## REFERENCIAS

- Mollah, M., Schennach, R. and Patscheide, J. (2000), "Plasma chemistry as a tool for green chemistry, environmental analysis and waste management", *Journal of Hazardous Materials*, 79(3), 301-320.
- Bardos, L. and Barankova (2010), "Cold atmospheric plasma: Sources, processes and applications". *Thin Films. Elsevier. ScienceDirect*, 518 (23),6705-6713.
- Kacprzyk, R. M. W. (2008), "Reactor de plasma de ionización inversa para descomposición de compuestos orgánicos volátiles", *Electrostatics 2007/ Journal of Physics: Conference Series 2008/ IOP publishing*, n/e.
- López-Callejas, R., Valencia-Alvarado, R., Mercado-Cabrera, A., Peña-Eguiluz, R., Muñoz-Castro, A. E., Barocio, S. R. y Rodríguez-Méndez, B. G. (2010), "Plasma applications in materials modification, environment and medicine", *Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México*, ININ, 1-21.
- Sato, T., Ito, D. and Nishiyama, H. (2005), "Reactive Flow Analysis of No thermal Plasma in a Cylindrical Reactor", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(4), 900-905.
- Moreno Saavedra, H., Pacheco Pacheco, M., Pacheco Sotelo, J., Torres Reyes, C. E. and Díaz Gomez, J. A. (2007), "Modeling and Experimental Study on Nitric Oxide Treatment Using Dielectric Barrier Discharge", *IEEE Transactions on Plasma Science*, 35(5),1533-1540.
- Taghvaei, H., Kheirollahivash M., Ghasemi, M., Rostami P., Gates B. C. and Reza Rahimpour M. (2014), "Upgrading of anisole in a dielectric barrier discharge plasma reactor", *Energy Fuels*, 28(7), 4545-4553.
- Fridman, A. (2008), *Plasma Chemistry*, Drexel:Cambridge University Press.
- Chabert, P. and Braithwaite, N. (2011), *Physic of Radio-Frecuency Plasmas*, Paris: Cambridge University.
- Dietz, C. (2001), *Desarrollo de Sistemas de Introduccion de Muestras en el Plasma de Microondas*, Madrid: UCM.
- Kogelschatz, U. (2003), "Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications", *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 23 (1), 1-45.

- Soto Ruvalcaba, L. (2014), *Desarrollo de un sistema para generación de plasma basado en una descarga de barrera dieléctrica coplanar*, Querétaro, Qro.: CICATA-IPN.
- Quiroz Velázquez, V. E., López Callejas, R., Peña Eguiluz, R., Mercado Cabrera, A., Valencia Alvarado, R., Hernández Arias, A. N., Barocio, S. R., Muñoz Castro, A. E. and De La Piedad Beneitez, A. (2013), "Pulsed Power Supply and Coaxial Reactor Applied to E. Coli", *Rev. Int. Contam. Ambie*, 29(sup. 2), 25-31.
- Eirez Izquierdo, J. E., Rodríguez González, F. and Pavoni Oliver, S. (2013), "Diseño de una Fuente de Alto Voltaje", *RIELAC xxxiv*(3), 22-31.
- De León Medellín, L. C. and Mata Jiménez, M. T. (2013), "Esquema de control híbrido para un convertidor multicelular de 3 niveles", *Congreso Nacional de Control Automático*, 663-668.
- López Cañón A. M. and Díez Medina R. F. (2011), "High Voltage DC/DC Multilevel Converter in Ladder Topology", *Ing. Univ. Bogotá*, 16 (1), 117-133.
- Fujita H. and Akagi H. (1999), "A 2-MHz 2-kW voltage-source inverter for low-temperature plasma generators: implementation of fast switching with a third-order resonant circuit", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35(1), 21-27.
- Fujita H., Akagi H. and Shinohara S. I. (1999), "A 2-MHz 6-kVA voltage-source inverter using low-pro low-temperature plasma generators", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1013-1020.
- Czapka T and Kacprzyk R. (2011), "Non-Thermal plasma reactor with back corona discharge electrode", *13th International Conference of Electrostatics. Journal of Physics: Conference Series. IOP publishing*, 1-4.
- Torres Reyes C. E., Pérez Martínez J. A. and Flores Fuentes A. A. (2013), "Implementación de un generador trifásico para descargas de plasma frío con electrodos convergentes", *Memoria de Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica Electro 2013*, 35, 157-160.
- Conde J. (2010), "Convertidores en cascada como sistema de transporte de agua", *IEEE RVP-Ar'2010*, pp. 1-6.
- Raizer Y. P. (1991), *Gas Discharge Physics*, Berlin: Springer-Verlag.