

Fuente resonante con carga inductiva para generar plasma frío

Jonathan- Salazar Martínez^a, Jorge Edmundo-Mastache Mastache^{bc}, Jesús-Namigtle Jiménez^c, Jaime-Rosales Davalos^b, José Jahir- García Morales^a

^a Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Estudiante Ingeniería Mecatrónica, 2019150480941@tesjo.edu.mx, Jocotitlán, Estado de México y México.

^b TECNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Catedrático Ingeniería Mecatrónica, jorge.mastache@tesjo.edu.mx, Jocotitlán, Estado de México y México.

^c Universidad de Ixtlahuaca CUI, Facultad de Ingeniería, jesus.namigtle@uicui.edu.mx, Ixtlahuaca de Rayón, Estado de México y México.

Resumen

El siguiente proyecto consiste en el diseño y armado de una fuente inversora de alto voltaje y frecuencia la cual tiene como finalidad la generación de un plasma frío, el sistema cuenta con una parte enfocada al control gracias a circuitos generadores de señal en conjunto con controladores de compuerta, lo que nos permite regular la intensidad del haz de plasma generado en las puntas de un transformador cuya relación es de 1:100.

El circuito se alimenta con dos fuentes de corriente directa (12V para el control y 25V para la etapa de potencia) esta fuente trabaja a 62 kHz y genera un voltaje de 1 kV, lo suficientemente potente para ionizar el aire del ambiente, para que el haz de plasma sea visible e incluso lograr una DBD (Descarga de Barrera Dieléctrica) la cual puede ser controlada y focalizada, el haz de plasma tiene aplicaciones variadas y otorga un manejo seguro para que su uso evite daños al operador.

El plasma es un gas parcialmente ionizado. Los arcos eléctricos, la barrera dieléctrica, la corona y las descargas directas piezoeléctricas ionizan los gases a presiones atmosféricas creando plasmas [1].

El plasma frío se basa en la dispersión en el aire de radicales hidroxilos (OH⁻), formados a partir de la humedad del ambiente [2]. Con el plasma generado se desglosan aplicaciones variadas entre las que se encuentra la desinfección y tratamiento de heridas, así como esterilización de instrumentos quirúrgicos, aguas residuales, medicamentos, alimentos y en ámbitos donde se necesite eliminar agentes bacterianos de alguna superficie, gracias a referencias previas [3] se conoce la eficacia del plasma lo cual lo hace un tema abierto avances.

Palabras clave— Dieléctrico, Frecuencia, Fuente, Plasma.

Abstract

The following project consists of the design and assembly of a high voltage and frequency inverter source whose purpose is the generation of a cold plasma; the system has a part focused on control thanks to signal generator circuits in conjunction

with controller circuits. gate, which allows us to regulate the intensity of the plasma beam generated at the tips of a transformer whose ratio is 1:100.

The circuit is powered by two direct current sources (12V for the control and 25V for the power stage). This source works at 62 kHz and generates a voltage of 1 kV powerful enough to ionize the ambient air, so that the beam of plasma is visible and even achieve a DBD (Dielectric Barrier Discharge) which can be controlled and focused, the plasma beam generated has varied applications and provides safe handling so that its use avoids damage to the operator.

Plasma is a partially ionized gas. Electric arcs, dielectric barrier, corona, and direct piezoelectric discharges ionize gases at atmospheric pressures creating plasmas [1].

Cold plasma is based on the dispersion in the air of hydroxyl radicals (OH⁻), formed from ambient humidity [2]. With the generated plasma, various applications are broken down, among which are the elimination and treatment of wounds, as well as sterilization of surgical instruments, wastewater, medicines, food and in the vicinity where it is necessary to eliminate bacterial agents from some surface, thanks to references previous studies [3] the efficacy of plasma is known, which makes it an open subject for advances.

Keywords— Dielectric, Frequency, Plasma, Source.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la electrónica y en especial la electrónica de potencia es una herramienta fundamental para el desarrollo de dispositivos biomédicos, que nos ayudan a solventar las necesidades actuales de la medicina moderna.

Es por esto por lo que el modelado de diversos instrumentos aplicando la electrónica de potencia se convierte en un campo importante a seguir.

Uno de los elementos de potencia más utilizado es la fuente de voltaje, el presente artículo muestra el desarrollo de una fuente que es capaz de generar un voltaje en el rango de 1.8kV-2.4kV para la generación de un plasma de manera efectiva y controlada.

Esta fuente consiste fundamentalmente en un inversor de alto voltaje el cual tiene control implementado, por lo tanto, nos permite variar el ciclo de trabajo y la frecuencia de nuestro sistema usando circuitos de tipo driver y generadores de PWM, así como un puente H de potencia, el amperaje de salida entregado está en orden de los mA haciéndola segura pues difícilmente se sufrirían daños físicos al manipular esta fuente.

El propósito de esta fuente es la generación del plasma, este estado de la materia tiene aplicaciones variadas, entre ellas se encuentra la desinfección de agentes bacterianos puesto que una infección es la entrada y desarrollo de un agente

bacteriano en el cuerpo de una persona o un animal [4] y que las infecciones en heridas, causadas por bacterias ponen en peligro la vida de millones de pacientes cada año [5] el plasma entra como una alternativa y método de desinfección importante a desarrollar, actualmente es poco usado, pero su efectividad es bien conocida [2], este procedimiento de desinfección consiste en generar un plasma frío controlable el cual puede ser direccionado a la herida en cuestión, este haz contiene electrones e iones que son completamente capaces de eliminar una gran parte de partículas infecciosas [3].

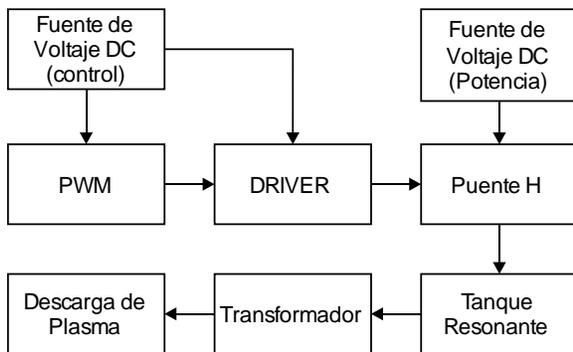
Esta tecnología de desinfección resulta beneficiosa, pues para su empleo no se ocupan sustancias tóxicas ni radiaciones elevadas, aparte de tener otras ventajas como evitar el gasto de insumos, dolor en la zona de aplicación e incluso la eliminación de olores desagradables [6].

2. DISEÑO Y SIMULACIÓN

El uso de una fuente conmutada (SMPW, switch-mode power supply), permite el uso de altas frecuencias necesarias para la realización de la Descarga de Barrera Dieléctrica, el diseño de la fuente se enfoca en un inversor con topología Full-Bridge o Puentes H.

La figura 1 muestra el diagrama a bloques del diseño de la fuente en el cual se parte de un Bloque generador de señal PWM el cual será el encargado de proporcionar 2 señales PWM desfasadas 180 grados que se aplican posteriormente a al bloque formado por los drivers controladores de compuerta que a su vez serán los encargados de proporcionar las activaciones de los MOSFETs que conforman el bloque del Puentes H.

Fig. 1. Diagrama a Bloques de la Fuente.

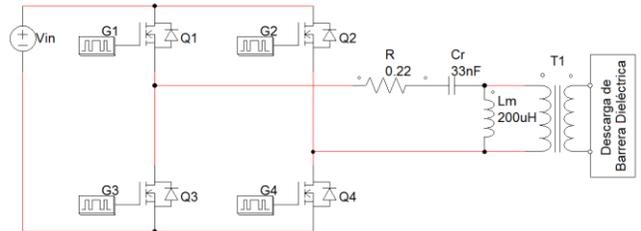


Fuente: Elaboración propia

El puente H se alimenta de una fuente independiente de los Bloques PWM y DRIVER, la salida de voltaje proporcionada por el puente H se aplica al bloque del tanque resonante formado por la inductancia magnetizante del Transformador L_m y un capacitor C_r , el transformador es el encargado de elevar el voltaje en con una relación de 1:10 el cual finalmente es aplicado a la descarga de plasma.

La figura 2 muestra la parte correspondiente al bloque de potencia y el tanque resonante, los MOSFETs Q1, Q2, Q3 Y Q4 se seleccionan en función de la potencia nominal (0-600 W) y la frecuencia de conmutación (0-150 kHz), por lo que el MOSFET IRF640 ($V_{DS(MÁX)}=200V$, $I_{DS(MÁX)}=18A$ y $R_{DS(MÁX)}=0.18m\Omega$), es apto para estas características. C_r es un capacitor de poliéster metalizado con valor de 33nF/1000V que junto con la inductancia magnetizante L_m del transformador de 200uH forma el puente resonante.

Fig. 2. Puentes H y Tanque Resonante.



Fuente: Elaboración propia

La frecuencia de resonancia del puente formado por el capacitor C_r junto con la inductancia L_m está dada por la **ecuación 1**, al aplicar los valores se tiene una frecuencia de resonancia $f_r=61.951kHz$.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_r L_m}} \quad (1)$$

La figura 3a corresponde al bloque encargado de la generación del PWM, se usa el circuito integrado TL494 en configuración push-pull de manera que se tengan 2 formas de onda PWM1 y PWM2 desfasadas 180 grados, El TL494 carga el capacitor C_t con una corriente constante determinada por la resistencia R_t esto da como resultado una forma de onda de diente de sierra, la cual una vez que alcance un valor 3V, el cual el ciclo es reiniciado descargando el capacitor C_t .

La frecuencia a la que el TL494 trabaja en configuración Push-Pull está dada por la **ecuación 2** donde R_t está conformado por un potenciómetro de precisión con valor de 10K, C_t es un capacitor de un valor de 10nF dando como resultado un rango de frecuencia desde 5kHz hasta los 250kHz,

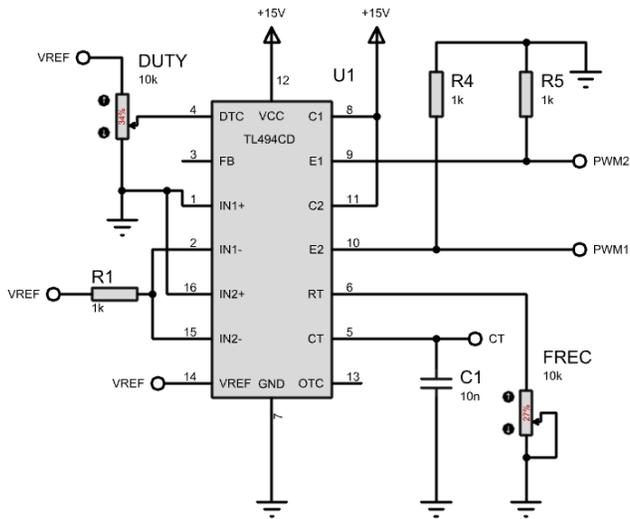
$$f_{osc} = \frac{1}{2R_t \times C_t} \quad (2)$$

El ciclo de trabajo es regulado mediante el uso de un potenciómetro con valor de 10K el cual varía el voltaje aplicado al terminal DTC del TL494 en un rango de 0-5V. El rango del ciclo de trabajo abarca del 0% a 47% el 3% restante se ocupa a modo de generar tiempos muertos a fin de evitar cortocircuitos por la activación simultánea de Q1 y Q3 o bien Q2 y Q4.

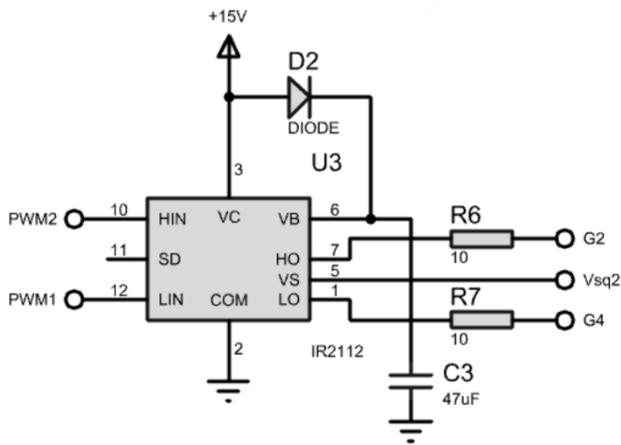
El bloque DRIVER se muestra en la figura 3b conformado por 2 drivers IR2110 los cuales reciben las señales PWM1 y

PWM2 y se encargaran de proporcionar los voltajes necesarios para las conmutaciones inferior y superior, requeridas por los MOSFETs del puente H, el primer IR2110 se encarga de las activaciones G1 y G3 mientras que el segundo IR2110 se encarga de las activaciones G2 y G4.

Fig. 3. Circuito PWM y Drivers



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia

Para este propósito se eligió un transformador elevador en capacidad de manejar hasta 700W de potencia con una relación de transformación de 1:10, el núcleo del transformador consta de una ferrita Ferroxcube EE55/28/21 de material 3C90 ($A_e=353\text{mm}^2$, $u_e=2410$)

El número de vueltas necesario para el primario del transformador se obtiene a partir de la fórmula 3.

$$n_1 = 10^4 \frac{\lambda}{2\Delta B A_c} \quad (3)$$

Donde λ corresponde a un voltaje-segundo de 2.42 V-ms, $A_c=353\text{mm}^2$ siendo el área del núcleo del transformador y ΔB

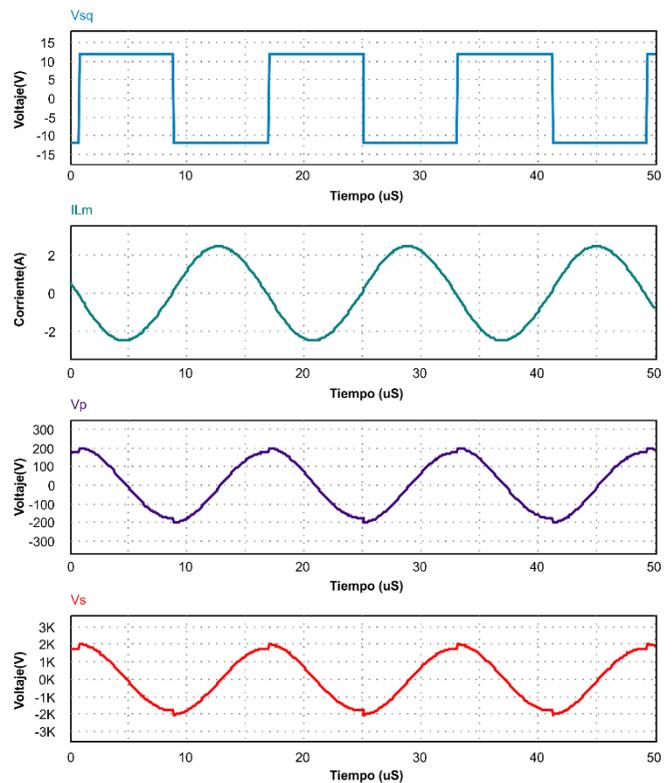
que corresponde a la densidad de flujo de CA máxima considerando un valor de $\Delta B = 0.23 T$, obteniéndose un total de vueltas de 14.90331 para el primario del transformador, y 149.03 vueltas para el secundario del transformador.

Obteniéndose un total de vueltas de 14.90331 para el primario del transformador, y 149.03 vueltas para el secundario del transformador.

Los parámetros del transformador fueron medidos físicamente usando un medidor LCR B&K PRECISION BK878B obteniéndose una lectura de 204.7uH para L_m y C_r de 33.28nF y una resistencia R de 0.220, aplicando la ecuación 1 para los valores medidos se tiene una frecuencia de resonancia de 60.97kHz.

Para validar el diseño propuesto se utilizó el software PSIM v9.1, obteniéndose como resultado de la simulación del circuito de la figura 2 las gráficas mostradas en la figura 4, en las cuales se visualizan las formas de onda de Voltaje del inversor (V_{sq} , color azul) correspondiente a una onda cuadrada con un voltaje bipolar de 12V, el voltaje en el Primario del transformador (V_p , color morado), el Voltaje en el secundario del Transformador (V_s , color rojo) y la corriente circulante en el primario del transformador (I_{Lm} , color verde) obteniéndose un voltaje de salida satisfactorio de aprox 2kVpp necesario para realizar la Descarga de Barrera Dieléctrica.

Fig. 4. Formas de onda de voltaje y corriente de la fuente.



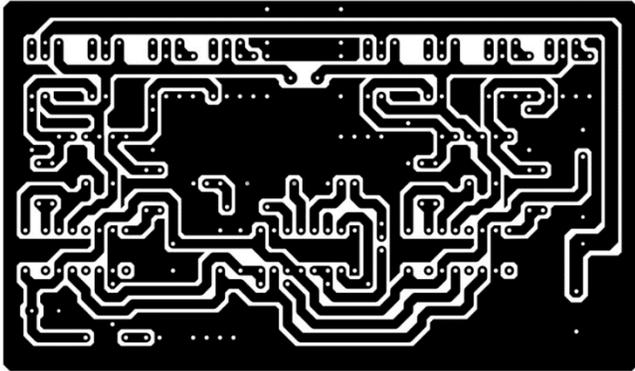
Fuente: Elaboración propia

Además de esto se exhibe claramente el cambio de estado en el voltaje del inversor al tiempo en el que la corriente del primario del transformador es cero demostrando el principio de un convertidor ZCS (Zero Current Switching).

3. MANUFACTURACIÓN DE LA FUENTE

Se decidió ocupar el software EASYEDA junto con el programa de diseño gráfico CORELDRAW, para la realización de la PCB del Inversor (figura 5) el cual contiene los bloques PWM, Driver y Puente H mientras que la parte del puente resonante realizo de manera separada.

Fig. 5. Diseño del PCB del Inversor



Fuente: Elaboración propia

El diseño final del inversor se observa en la figura 6 mostrando la parte de potencia (MOSFETs) en la parte posterior que constituyen el Puente H, el TL494 ubicado en el centro encargado de la generación del PWM así como los drivers IR2110 en los laterales del PCB.

Fig. 6. Prototipo del inversor



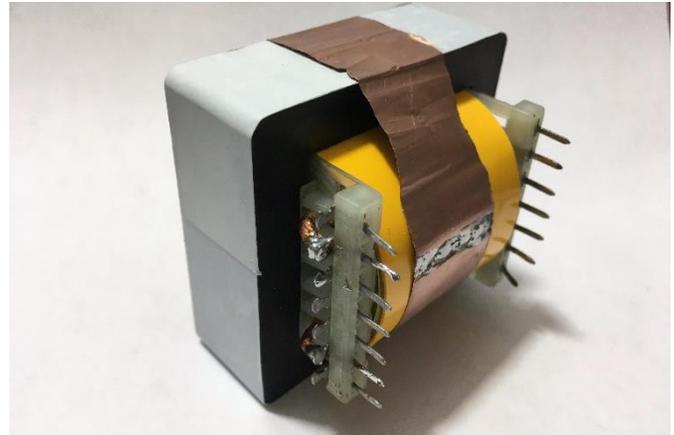
Fuente: Elaboración propia

La figura 7 muestra el transformador una vez armado el cual se hizo a base del núcleo Ferroxcube EE55/28/21 de material 3C90, con el propósito de reducir al mínimo las pérdidas por efecto pelicular en los conductores del transformador se optó por el uso de cable de Litz de 200 hilos para el bobinado primario del transformador y se ocupó alambre de cobre esmaltado calibre 24 para el bobinado secundario.

4. RESULTADOS

El montaje de la fuente se realizó de acuerdo a los parámetros mencionados en la sección 2, la figura 8 se muestra el montaje del prototipo el cual contiene los bloques PWM, DRIVER y Puente H así como el tanque resonante compuesto por el capacitor Cr y el Transformador, para la alimentación del prototipo se utilizó una fuente comercial UNI-T UTP-3305-II la cual cuenta con 2 canales los cuales pueden operar en un voltaje de 0 a 32V.

Fig. 7. Construcción del Transformador



Fuente: Elaboración propia

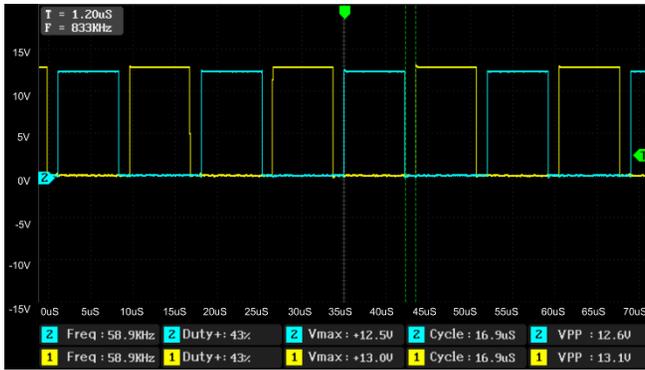
Mediante el uso de un osciloscopio se realizan las mediciones del bloque PWM representado en la figura 9, en el cual se aprecian los desfases que presentan cada una de las señales PWM generadas por el TL494, se obtuvo un ciclo de trabajo de 42% a una frecuencia de 58.9kHz, la forma de onda que corresponde a las activaciones de los MOSFETs Q1 y Q4 se denota en color azul mientras la que corresponde a los MOSFETs Q2 y Q3 se denota en color amarillo, ambas con un voltaje de 12.5V, se aprecia de igual forma el tiempo muerto generado equivalente a 1.20us para evitar la activación simultanea de los MOSFETs Q1 y Q3 o Q2 y Q4.

Fig. 8. Montaje de la Fuente Diseñada



Fuente: Elaboración propia

Fig. 9. Formas de onda generadas por el TL494



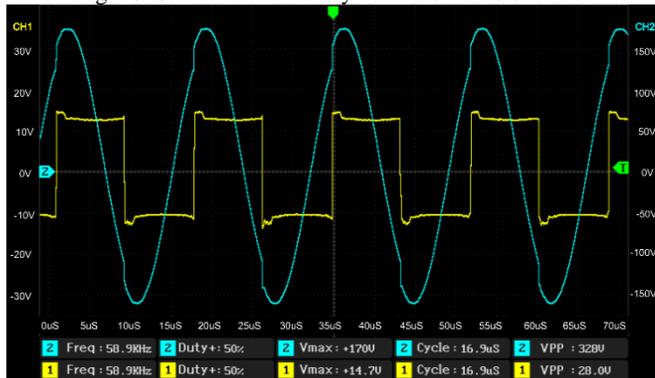
Fuente: Elaboración propia

La figura 10 muestra las formas de onda resultantes de la salida del inversor denotada en color amarillo obteniéndose un voltaje de 28Vpp así como la frecuencia aplicada de 58.9kHz, la forma de onda aplicada al primario del transformador denotada en color azul muestra una forma cuasi-senoidal con un voltaje de 328Vpp lo cual fue un poco menor a los resultados obtenidos en las simulaciones.

Debido a la falta de una punta para alto voltaje solo se estima el voltaje de salida en base a la relación de aumento del transformador 1:10 y el voltaje aplicado al primario de 328Vpp, con lo cual el voltaje de salida estima en 3280Vpp

Dado que el propósito de la fuente es la generación de plasma frío se realiza una prueba de descarga de plasma la cual se muestra en la figura 10 la prueba se realizó en base a un tubo de cuarzo el cual contiene gas Argón en su interior tomando como electrodo positivo el que se encuentra al interior del tubo, electrodo negativo consta de una lámina de aluminio sobre la cual se coloca debajo del el tubo de descarga, actuando el cuarzo a modo de dieléctrico, al aplicar el voltaje proveniente del transformador se observa la ionización del gas de manera clara.

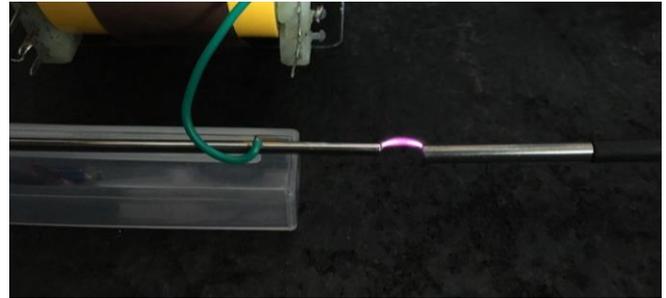
Fig. 10. Salida del Inversor y Primario Transformador



Fuente: Elaboración propia

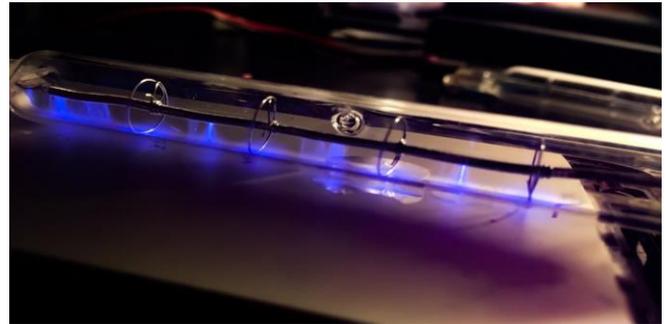
Dado que el propósito de la fuente es la generación de plasma frío se realiza una prueba de descarga de plasma la cual se muestra en la figura 12 la prueba se realizó en base a un tubo de cuarzo el cual contiene gas Argón.

Fig. 11. Arco eléctrico formado entre los electrodos.



Fuente: Elaboración propia

Fig. 12. Visualización del plasma en un tubo de descarga



Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La fuente de poder desarrollada permite una operación de un rango de frecuencia desde los 5kHz hasta los 250 kHz y un rango de ciclo de trabajo desde 0 hasta el 43% el cual acoplado a una fuente voltaje es capaz de proveer hasta 4kVpp, poder variar la frecuencia permite ajustarla a la frecuencia natural del tanque resonante realizando los cambios de estado de los MOSFETs en el puente H a una corriente 0, obteniéndose de esta manera una fuente con las propiedades de un ZCS (Zero Current Switching) lo que reduce al mínimo las pérdidas por conmutación.

La fuente diseñada fue probada tanto en simulaciones numéricas, así como en el circuito construido en físico, obteniéndose de ambos resultados consistentes y coherentes.

El plasma generado será muy útil para la aplicación en el campo biomédico en el cual se considerará un prototipo de lápiz de plasma basado en la ionización de gas helio a través de una descarga de barrera dieléctrica mediante un tubo de cuarzo con un electrodo interno y uno externo, se tiene pensado su uso para la desinfección y tratamiento de heridas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecemos el apoyo que se ha tenido de equipo e infraestructura, para el desarrollo de este proyecto, por parte del TECNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Jcotitlán y de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Ixtlahuaca CUI.

7. REFERENCIAS

- [1] “Desinfección y esterilización del plasma”. Recuperado de: <https://www.relyon-plasma.com/applications/desinfeccion-con-plasma/?lang=es>
- [2] (2010). “Tecnologías de plasma frío para eliminar patógenos en los alimentos”. Recuperado de: <https://alimentatec.com/tecnologias-de-plasma-frio-para-eliminar-patogenos-en-los-alimentos/#:~:text=El%20plasma%20fr%C3%ADo%20se%20basa,de%20hidr%C3%B3geno%20causando%20su%20muerte>
- [3] J. Rubio. (2017). “Las bacterias resistentes se generan por un proceso de selección natural”. Recuperado de: <https://www.elsevier.com/es-es/connect/medicina/las-bacterias-resistentes-se-generan-por-un-proceso-de-seleccion-natural>
- [4] Martínez-Montejano, R. C., Castillo-Escandón, C. M., Espinoza-López, V. E., Campos-Cantón, I., Neira-Velázquez, M. G., & Soria-Arguello, G. (2019). Construcción de una fuente de electrónica de potencia para generación de plasma frío. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 20(4).
- [5] L. Martínez Bagur. (2013). “Guía de Antisépticos y Desinfectantes”. España: Instituto Nacional de Gestión Sanitaria
- [6] Organización Mundial de la Salud. (2016). “La OMS recomienda 29 formas de detener las infecciones quirúrgicas y evitar microorganismos multirresistentes”. Recuperada de: <https://www.who.int/es/news/item/03-11-2016-who-recommends-29-ways-to-stop-surgical-infections-and-avoid-superbugs#:~:text=Las%20infecciones%20quir%C3%B3rgicas%20causadas%20por,los%20pacientes%20operados%20sufren%20infecciones>