

DESARROLLO DE UNA FUENTE DE ALIMENTACIÓN ELECTRÓNICA, BASADA EN UN CIRCUITO DE IONIZACIÓN DE CORRIENTE SIMMER, PARA UN LÁSER PULSADO DEL TIPO YAG:Nd⁺⁺⁺
DEVELOPMENT OF AN ELECTRONIC POWER SUPPLY, BASED ON A IONIZATION SIMMER CURRENT CIRCUIT FOR A YAG:Nd⁺⁺⁺ PULSED LASER

Omar Ormachea y Juan Maidana

Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE)

Universidad Privada Boliviana

oormachea@upb.edu

(Recibido el 08 mayo 2016, aceptado para publicación el 10 de junio 2016)

RESUMEN

El siguiente trabajo presenta la implementación de una fuente de alimentación electrónica, basada en un circuito de ionización de corriente simmer, aplicado a una lámpara flash con Xe, para la excitación de un cristal del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺. Para el diseño y dimensionamiento de este circuito se utilizaron elementos comerciales de bajo costo. La ventaja de utilizar el circuito de corriente simmer, consiste en la aplicación de alto voltaje (aproximadamente 20 kV) solo una vez, para ionizar la lámpara flash y mantenerla ionizada de manera continua, con una corriente mínima de 40 mA. Este régimen de trabajo de la lámpara flash, permite trabajar al sistema, con frecuencias de disparo hasta los 10 Hz. La aplicación de este circuito en la fuente de energía para los sistemas láseres del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺ no solo adopta una medida de seguridad importante, al evitar el alto voltaje frecuentemente, sino que también alarga el tiempo de vida de las lámparas utilizadas e incrementa la estabilidad de la salida óptica entre pulsos láser.

ABSTRACT

This work introduces the implementation of a simmer current circuit applied to a Xe flash lamps, for excitation of a YAG: Nd⁺⁺⁺ crystal type. Low-cost commercial elements were used for designing and dimensioning of this circuit. The advantage of using the simmer circuit involves the application of high voltage (about 20 kV) only once, to ionize the flash lamp and keep ionized continuously, with a minimum current of 40 mA. This flash lamp work regime permits working with frequencies shooting above 10 Hz The application of this circuit inside the power source for YAG: Nd⁺⁺⁺ type laser systems, not only adopts an important security measure, avoiding the frequent use of high voltage but also lengthens the lifetime of the lamps used, and increases stability of the optical output from laser pulses.

Palabras Clave: Corriente Simmer, Desarrollo de Tecnología Láser, Láseres Pulsados.

Keywords: Simmer Current, Development of Laser Technology, Pulsed Lasers.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas láseres de estado sólido tanto pulsados como continuos, históricamente han utilizado lámparas de arco rellenas con kriptón o xenón, como fuentes de excitación óptica [1]. En 1960 cuando T.H. Maiman desarrollo el primer dispositivo láser pulsado en la región visible del espectro electromagnético, utilizó lámparas flash de arco de naturaleza muy básica, de manera específica el láser de rubí de Maiman fue bombeado ópticamente por una lámpara flash helicoidal desarrollada por la General Electric, que fue fabricada para fotografía convencional [2, 3].

La producción de lámparas flash ha progresado hasta el punto de que muchos de los diseños avanzados de alto rendimiento están disponibles rutinariamente y pueden ser construidos en pequeñas cantidades o en corto plazo. Mucho trabajo se ha llevado a cabo en los últimos años para mejorar aún más la tecnología de lámpara de arco y para las aplicaciones más exigentes. Una gran parte del trabajo de desarrollo de este tipo de lámparas se concentra en el diseño y fabricación del cátodo, para condiciones rigurosas de funcionamiento, altas potencias y duraciones de pulso de disparo en el orden de los milisegundos [4]. Adicionalmente en la mayoría de los circuitos de disparo de lámparas flash de arco, el voltaje en el condensador de almacenamiento de energía es menor que el umbral de voltaje de disparo de la lámpara. Comúnmente todos los dispositivos de descarga flash en gases y de lámparas de arco exhiben una resistencia extremadamente alta en su estado no conductor. Para poder realizar el disparo de estos dispositivos opto-electrónicos, se requiere de la aplicación de un pulso de alto voltaje del orden de unos cuantos kV para ionizar el gas que se encuentra dentro estas lámparas. Existen diferentes esquemas electrónicos desarrollados para el disparo y puesta en funcionamiento de las lámparas flash de arco, llamados modos de triggering [5], entre los cuales está, el denominado sistema de operación de corriente simmer [6], este esquema permite utilizar el pulso de alto voltaje de ionización solo una vez y aumenta el tiempo de vida útil de las lámparas substancialmente, que son utilizadas en láser industriales, que trabajan con altas energías y altas frecuencias [4, 5].

En el Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE) de la Universidad Privada Boliviana (UPB) se ha estado trabajando desde el 2007 en el desarrollo de láseres pulsados del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺ [7, 9], para diferentes aplicaciones como Laser Induced Break-down Spectroscopy (LIBS) [10, 11] y otras. En los dispositivos construidos se lograron desarrollar los diferentes modos de triggering, como el trigger externo y el trigger en serie [12], sin embargo el sistema de operación de corriente simmer no fue implementado en ninguno de los dispositivos con los que cuenta la UPB. El desarrollo e implementación de este circuito específico de triggering permitiría optimizar substancialmente los dispositivos láser que son utilizados en la técnica de espectroscopía de emisión atómica (LIBS) y otras aplicaciones, permitiendo una vida útil más larga de las lámparas utilizadas, la posibilidad de aumento de la frecuencia de operación de los láseres pulsados mencionados y además incrementar la estabilidad de la salida óptica entre pulsos láser.

2. CIRCUITOS DE DISPARO DE LA LÁMPARA FLASH (TRIGGER)

Las lámparas flash utilizadas en la mayoría de los sistemas láseres de estado sólido, requieren de un pulso de disparo para permitir la ionización inicial del gas (Kr ó Xe) que se encuentra dentro [4, 5]. Las características eléctricas para este pulso rondan entre 20 a 30 kV y con duración del orden de microsegundos. El circuito de acondicionamiento de disparo para aplicar el alto voltaje a la lámpara presenta tres esquemas fundamentales:

2.1 Disparo (Trigger) externo

En este esquema (Figura 1a), un pulso de disparo de alta tensión proveniente de un transformador elevador de voltaje (trigger), se aplica a un alambre de níquel envuelto alrededor del exterior de la lámpara flash; este circuito es aplicable solamente a lámparas enfriadas únicamente con aire. Este es el método de activación más sencillo, barato y fácil de implementar. El transformador de disparo externo es un componente pequeño y ligero, que generalmente viene encapsulado. Este tipo de disparador externo permite una mayor flexibilidad en el diseño de circuitos, pues el transformador está fuera del sistema principal de descarga.

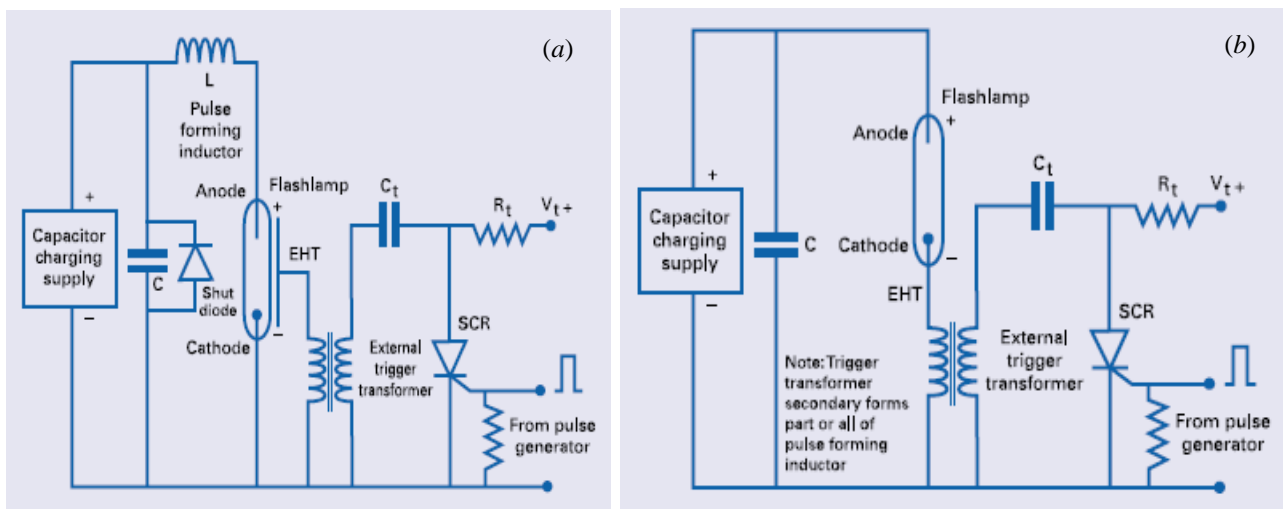


Figura 1 – Circuitos de disparo (triggering) externo (a) y en serie (b) [4].

El circuito de disparo trigger externo, no se encuentra a menudo en los láseres de estado sólido industriales, aunque se usa ampliamente para lámparas flash de destellos utilizados para aplicaciones fotográficas, estroboscopios, lámparas de destellos de alta velocidad y sistemas de láser de baja potencia de un solo disparo, como en los telémetros láser. Una de las principales desventajas de este esquema es que el alto voltaje está presente en el exterior de la lámpara, lo que hace difícil el aislamiento por ejemplo, si la lámpara se utiliza en una cavidad resonante láser de metal.

2.2 Disparo (Trigger) en serie

Esta configuración (Figura 1b), comprende en su esquema la conexión del secundario del transformador elevador de voltaje (trigger) en serie directamente a uno de los electrodos de la lámpara. Después de la activación, la corriente de la lámpara fluye a través del devanado secundario del transformador de disparo, este actúa como parte o en su totalidad del circuito de formación del pulso (pulse forming network "PFN" por sus siglas en inglés [13]), en consecuencia fluyen corrientes altas, por encima de los 1500 amperios, por el devanado secundario del transformador, haciendo que este elemento sea mucho más grande, más pesado y caro en comparación con un transformador de disparo externo (trigger externo).

El circuito de trigger en serie se utiliza ampliamente en sistemas industriales de alta potencia de láseres de estado sólido, ofrece una mejor fiabilidad a largo plazo en comparación con el trigger externo y tiene la ventaja de que no existen altos voltajes presentes en el exterior de la lámpara, lo cual permite que la refrigeración de la lámpara flash pueda ser forzada, a través de un sistema basado en un fluido como el agua destilada y des-ionizada.

2.3 Circuito de ionización de corriente simmer

El circuito de corriente simmer (fuego lento) en tubos de ionización, se encuentra generalmente en láseres pulsados que trabajan con lámparas flash de Xenón (Figura 2a), las cuales para poder operar inicialmente requieren de la aplicación de un pulso de alto voltaje del orden de kV, para ionizar el gas que se encuentra dentro estas lámparas.

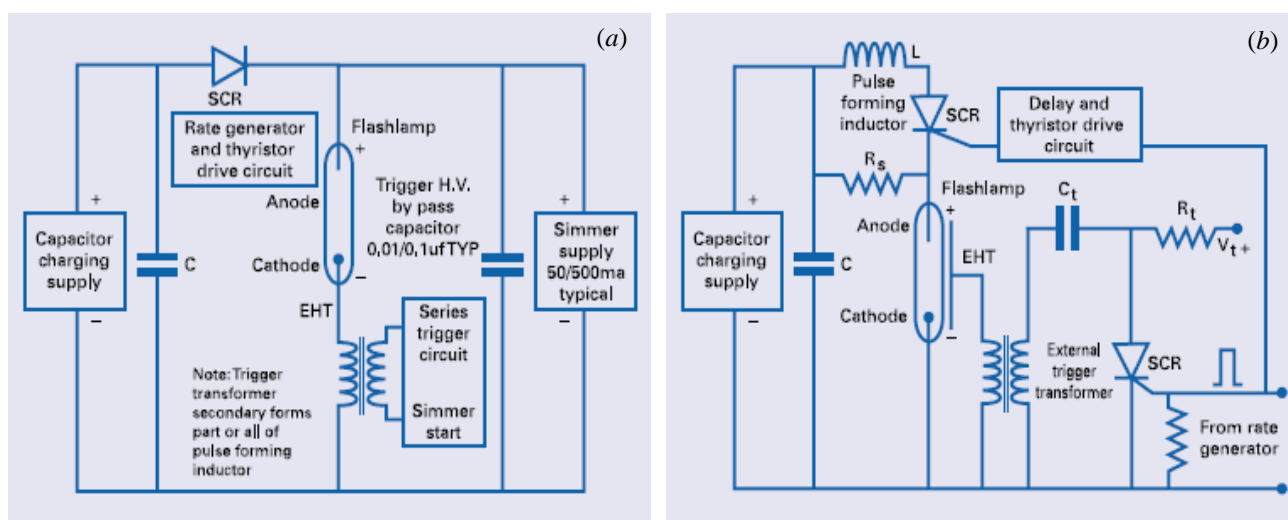


Figura2 – Circuitos de ionización de corriente simmer (a) y pseudo-simmer (b) [4].

Después de la activación de la lámpara flash (triggering), una corriente mínima DC se mantiene a través de la lámpara (corriente simmer), los valores típicos están en el orden de 50-500 miliamperios. El pulsado de la lámpara es controlado por un SCR en el circuito principal de descarga, donde generalmente se requieren esquemas de retardo en la fuente de alimentación del condensador de potencia, para permitir que el SCR pueda desconectar completamente el flujo de corriente proveniente del condensador de potencia, hacia la lámpara, después del pulsado.

Adicionalmente se requieren componentes de una red de conmutación de Snubber [14] para proteger al SCR, la función de la red de Snubber es la de eliminar la tensión transitoria cuando el interruptor se abre, proporcionando una ruta alternativa para el flujo de corriente a través de esta red. El controlador SCR debe ser capaz de manejar altas corrientes pico, generalmente mayores a 1500 amperios.

2.4 Circuito de ionización de corriente pseudo-simmer

En la Figura 2b se muestra el circuito denominado pseudo-simmer, este esquema es generalmente usado en sistemas portátiles, donde se utiliza un trigger externo, aunque puede ser usado uno en serie. La corriente proveniente del capacitor de potencia inicialmente es limitada a aproximadamente 50 miliamperios, por la resistencia R_s , después de un retardo de 100-200 ms esta resistencia es cortada por el SCR y la descarga principal ocurre entre el condensador de potencia y la lámpara flash. En este caso también se requieren componentes de una red de conmutación de Snubber para proteger al SCR y todas las ventajas de la corriente simmer son obtenidas en este esquema, como la estabilidad óptica entre pulsos del sistema láser.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA FUENTE DE ALIMENTACION ELECTRÓNICA DE UN LÁSER DEL TIPO YAG: Nd^{+++} , BASADA EN UN CIRCUITO DE IONIZACIÓN DE CORRIENTE SIMMER

El diseño y construcción de una fuente de alimentación electrónica de un láser YAG: Nd^{+++} , se realiza a partir de la experiencia adquirida en construcción de prototipos láser el Centro de Investigaciones Ópticas y energías (CIOE) [7, 9] de la UPB.

El diseño se enfoca en las diferentes tareas realizadas por la lámpara de Xenón y los mecanismos necesarios para la generación de radiación láser. El siguiente diagrama (Figura 3) explica los diferentes bloques que intervienen en el

proceso del diseño y construcción de la fuente de alimentación electrónica del láser. La aplicación del circuito de corriente simmer cambia por completo la idea de control del disparo del láser, en prototipos anteriores el disparo de la lámpara era realizado mediante la ionización del gas de la lámpara, en cada disparo, aplicando un pulso de alto voltaje, en este nuevo esquema, el control se lo realiza mediante la conmutación de la energía del bloque de potencia con un tiristor SCR.

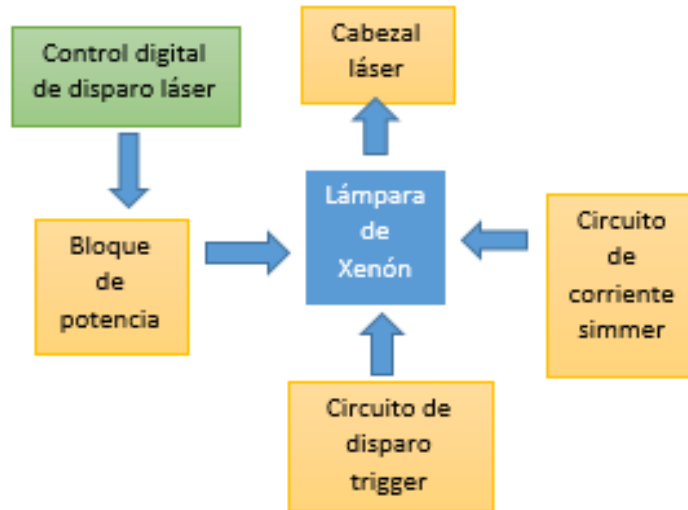


Figura3 – Bloques funcionales del dispositivo láser.

3.1 Circuito de disparo trigger

En el diseño del circuito de disparo trigger se eligió un esquema en paralelo, que se muestra en la Figura 4, donde se tiene un puente rectificador de onda completa, que rectifica la corriente alterna de 220 VAC a 308 VDC, con este voltaje se carga el condensador C1, que a su vez, a través del transformador TR2, con un factor de amplificación de 68 se obtiene un voltaje de aproximadamente 21 kV, que es suficiente para ionizar la lámpara flash de xenón.

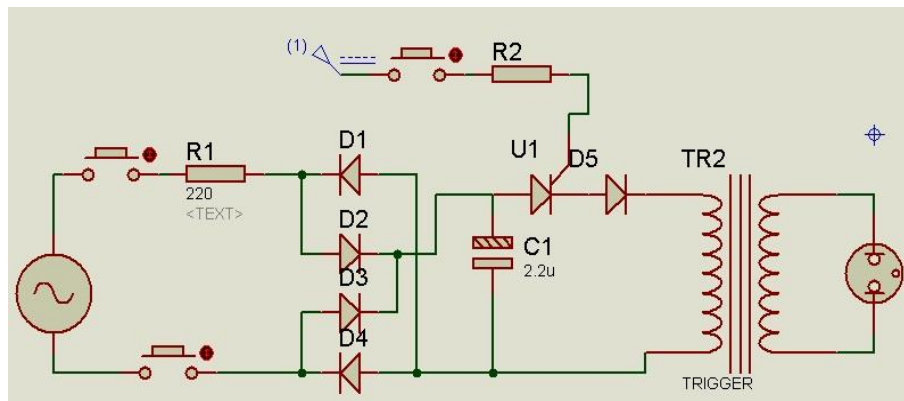


Figura4 – Circuito de control de disparo trigger de alto voltaje.

El sistema de control utiliza un SCR para la activación del transformador trigger, el pulso de alto voltaje se activa solo una vez para lograr la ionización de la lámpara de xenón. El capacitor C1 utilizado tiene las siguientes características: $V=600$ VDC, $C=0,1$ μ F, los diodos utilizados en el sistema de rectificación fueron del tipo 1N5408.

3.2 Circuito de ionización de corriente simmer

El circuito de ionización de corriente simmer está compuesto por una fuente de alimentación de DC, para lo cual inicialmente se diseñó y construyó un transformador con las siguientes características: El voltaje que debe alcanzar el transformador después de la rectificación, en el devanado secundario, es de aproximadamente 500 V y un amperaje del orden de los 100 mA DC. Teniendo una tensión de 220 VAC de la red eléctrica en el devanado primario, se requiere aproximadamente de 371 VAC en el devanado secundario, el cual está conectado a un puente rectificador de onda

completa, proporcionando 519 VDC necesarios para mantener ionizada la lámpara después del pulso de alto voltaje. El principio básico del funcionamiento de un transformador es la existencia mutua de un flujo magnético, cuya amplitud dependerá del voltaje, frecuencia y número de espiras aplicadas en el devanado primario. Basados en estos parámetros electromagnéticos, en conjunto a las vueltas aplicadas en un devanado secundario, definirán la relación de voltaje respecto al primario [15]. La siguiente ecuación proporciona una relación de voltaje y números de espiras en cada devanado:

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{V_P}{V_S} \quad (1)$$

donde: N_p = Número de espiras en el primario, V_p = Voltaje en el primario, N_s = Número de espiras en el primario, V_s = Voltaje en el secundario.

Los transformadores son sumergidos en aceite con la tarea de enfriar y asilar, logrando una mejor capacidad térmica y rigidez dieléctrica comparada al aire [16], para el cálculo experimental del transformador a construir se requieren medir los siguientes parámetros: Primero se considera la sección del núcleo, midiendo el largo y el ancho, central, en la Figura 5 se puede observar la forma del núcleo metálico formado por chapas. La ecuación (2) permite encontrar el área del núcleo:

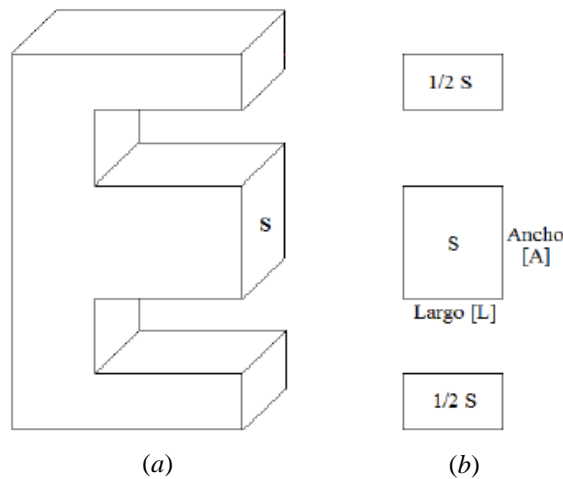


Figura 5 – Chapas del transformador, vista lateral (a), vista frontal (b)

$$S = L * A \quad (2)$$

Aplicadas en la siguiente ecuación (3), se puede identificar el parámetro N que es el número de espiras en el primario:

$$N = \frac{10^8 * V}{4,44 * f * B * S} \quad (3)$$

donde:

N - número de espiras en el primario

V - voltaje en el primario

B- constante de flujo del núcleo

f - frecuencia

A partir de estas relaciones, se puede encontrar el parámetro k, denominado constante de curva, que permite identificar la potencia del núcleo del transformador [17].

$$k = \frac{1}{N} \quad (4)$$

Con la ecuación (2) se estimó el área del núcleo del transformador:

$$S = L * A = 2,2 \text{ cm} * 3 \text{ cm} = 6.6 \text{ cm}^2$$

Aplicados a la ecuación (3) de número de espiras por un voltio se obtuvo:

$$N = \frac{10^8 * V}{4,44 * f * B * S} = \frac{10^8 * 1 * V}{4,44 * 50 * 9300 * 6,6} = 7,33 \text{ espiras/V}$$

Este resultado indica que se necesita 7,33 espiras por cada voltio en el transformador, como se necesita transformar de 220 VAC a 371 VAC se estimó:

$$\text{Número de espiras} = \frac{7,33 \text{ espiras}}{V} * 220 (V) = 1\,612,6 \text{ espiras}$$

$$\text{Número de espiras} = \frac{7,33 \text{ espiras}}{V} * 371 (V) = 2\,719,4 \text{ espiras}$$

El transformador fue construido de manera manual (Figura 6a), donde se utilizó cable de calibre 29 AWG. En la Figura 6b se muestra circuito de ionización de corriente simmer, donde el transformador está conectado a un puente rectificador de onda completa, donde se utilizaron cuatro diodos del tipo 1N5408, el capacitor C1 esta compuesto por cuatro capacitores, de 680 μF y 200 VDC cada uno, conectados en serie, donde el voltaje máximo de operación es de 800 VDC y una capacitancia total de 170 μF .

El circuito comprende una resistencia limitante de corriente 6 k Ω y 40 W de potencia (R1), el rol de esta resistencia es el de limitar la corriente que fluye a través de la lámpara una vez que esta fue ionizada, manteniendo el régimen de corriente simmer o fuego lento.

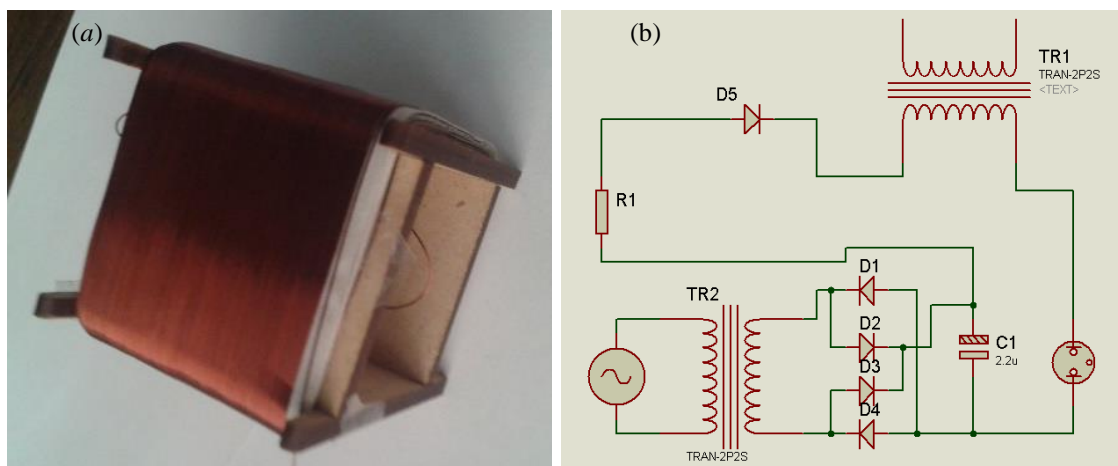


Figura 6 – Devanado del transformador (a), circuito de ionización de corriente simmer (b).

El diodo D5 en la Figura 6b, tiene el rol de no dejar pasar señales inversas producidas por la lámpara flash al prenderse, sin embargo el valor del voltaje del secundario del transformador trigger es de 21 kV, en ese sentido se deben usar un diodo de alta potencia. En el presente esquema presentado se obtiene una corriente simmer del orden de los 40 miliamperios y una potencia de aproximadamente 20,8 W.

3.3 Bloque de potencia

Gracias a la implementación del circuito de ionización de corriente simmer la lámpara de xenón se mantendrá ionizada de manera permanente después de aplicar por única vez el alto voltaje proveniente del sistema de trigger en serie. En estas circunstancias el valor de la impedancia de la lámpara, antes del pulso de alto voltaje, es muy alto y una vez ionizada se reduce hasta el orden de unidades de ohmios. Bajo estas circunstancias el bloque de potencia no puede estar conectado de manera permanente a la lámpara, ya que la lámpara al poseer una resistencia baja genera un corto circuito al momento de cargar a los condensadores de potencia (Figura 7). Es necesario por el motivo mencionado, un conmutador electrónico para poder controlar el destello, el elemento seleccionado para la conmutación es un tiristor SCR que soporte el voltaje y corriente pico que se presenta al momento del disparo.

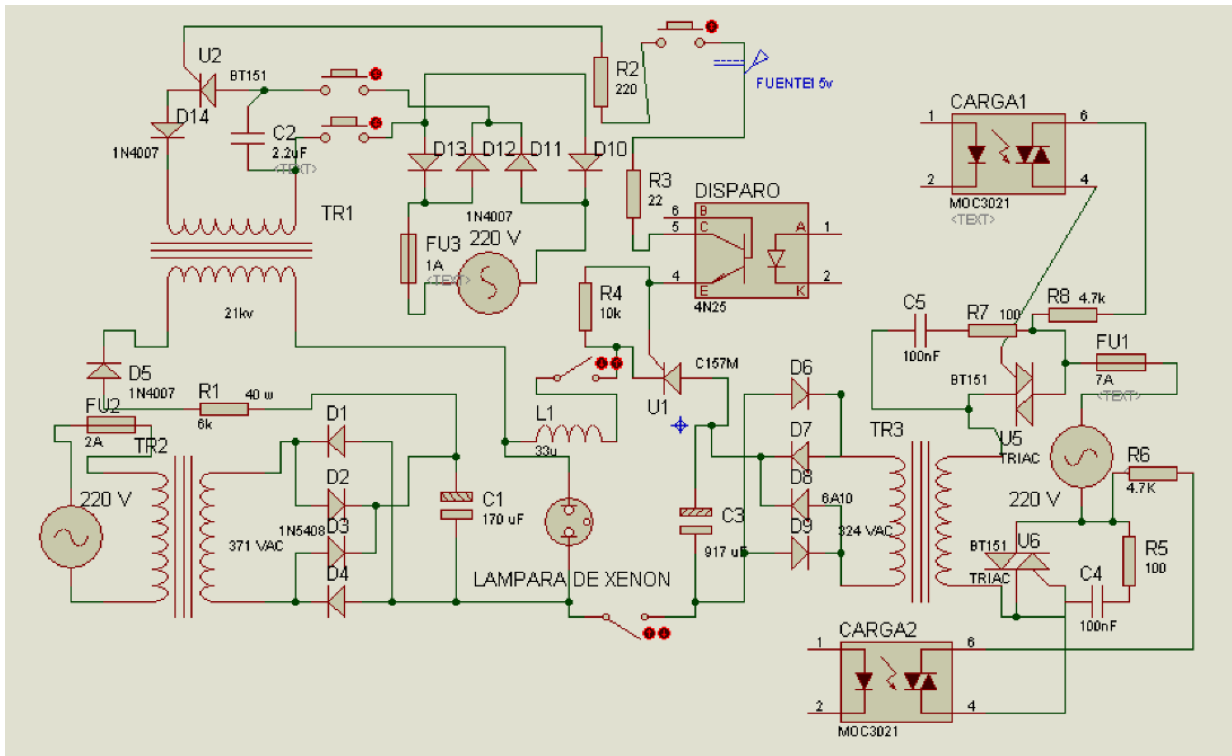


Figura 7 – Circuito electrónico de funcionamiento de la lámpara flash de Xe, basada en un circuito de ionización de corriente simmer.

El SCR utilizado para el control de disparo fue el C157MX168 de alta potencia de la marca General Electric que soporta corrientes pico de 1800 amperios (en periodos cortos no superiores a 8.3 ms) y 600 V, la corriente continua con la que opera es de 110 amperios y el voltaje máximo con la que opera el terminal de control es de 3 V. Como el tiempo de descarga de la lámpara dura aproximadamente 230 μ s [4, 5], este tiristor puede operar bajo estas condiciones de diseño.

Para el circuito de potencia se utilizó un bloque de seis capacitores cada uno de 200 VDC y 5500 μ F, conectados en serie, este bloque puede soportar 1200 VDC, con una capacitancia total obtenida de 917 μ F. Este bloque es alimentado por un transformado de múltiples entradas y múltiples salidas que proporciona hasta 324 VAC. Una vez identificados los valores de umbral de generación láser se definió el rango de energías a almacenar en los condensadores de potencia (56,1 – 70,4 J), siendo el voltaje máximo utilizado de 392 VDC.

$$E_0 = \frac{C \cdot V_0^2}{2} = \frac{917 \mu\text{F} \cdot (392\text{V})^2}{2} = 70.45 \text{ [J]} \quad (5)$$

$$P = \frac{E}{t} = \frac{70.45 \text{ J}}{230 \mu\text{s}} = 306304.34 \text{ [W]} \quad (6)$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{306304.34 \text{ W}}{392 \text{ V}} = 781.38 \text{ [A]} \quad (7)$$

3.4 Control digital de disparo

Por las distintas facilidades que ofrecen la operación de los microcontroladores, los reducidos costos de adquisición de uno de estos integrados y la capacidad de poder cargar el programa múltiples veces con la ayuda de un computador y un grabador de PIC, hace que este dispositivo sea muy atractivo para el control de distintos elementos del sistema como TRIACS, SCR y periféricos visuales como las pantallas LCD.

Se eligió al microcontrolador 16F877A PIC, para el control del circuito electrónico de un láser del tipo YAG: Nd⁺⁺⁺, basada en un circuito de ionización de corriente simmer, este microcontrolador cuenta con 40 pines, suficientes para la conexión de un display LCD de 16x2 como visualizador de información, también las señales de entrada, como las que

vienen de los pulsadores que controlan la frecuencia de disparo, además de los distintos pines de salida para controlar el TRIAC, el SCR, como también poder sincronizar el láser con otros dispositivos externos.

La principal tarea que se debe cumplir es sincronizar los tiempos de carga y disparo del bloque de potencia del láser, considerando que estas dos señales no pueden ser activadas al mismo tiempo, sino una después de otra para evitar cortocircuitos en el dispositivo.

En la Figura 8 se muestra la disposición de pines del circuito de control del dispositivo láser, el puerto D del microcontrolador esta designado para la comunicación con un display LCD 16x2, que indica la frecuencia y la energía de disparo. Se tienen dos pines de entrada C0 y C1 pertenecientes a dos pulsadores que controlan la frecuencia de disparo de 1 a 10 Hz, también cuenta con cuatro salidas, de las cuales dos envían señales idénticas a ambos TRIACS C6 y C7 que controlan las dos líneas de la red eléctrica del bloque de potencia. Otra pin C5 envía señal al SCR de disparo y la última C4 envía un señal permanente a un LED como muestra de que el microcontrolador está encendido y funcionando.

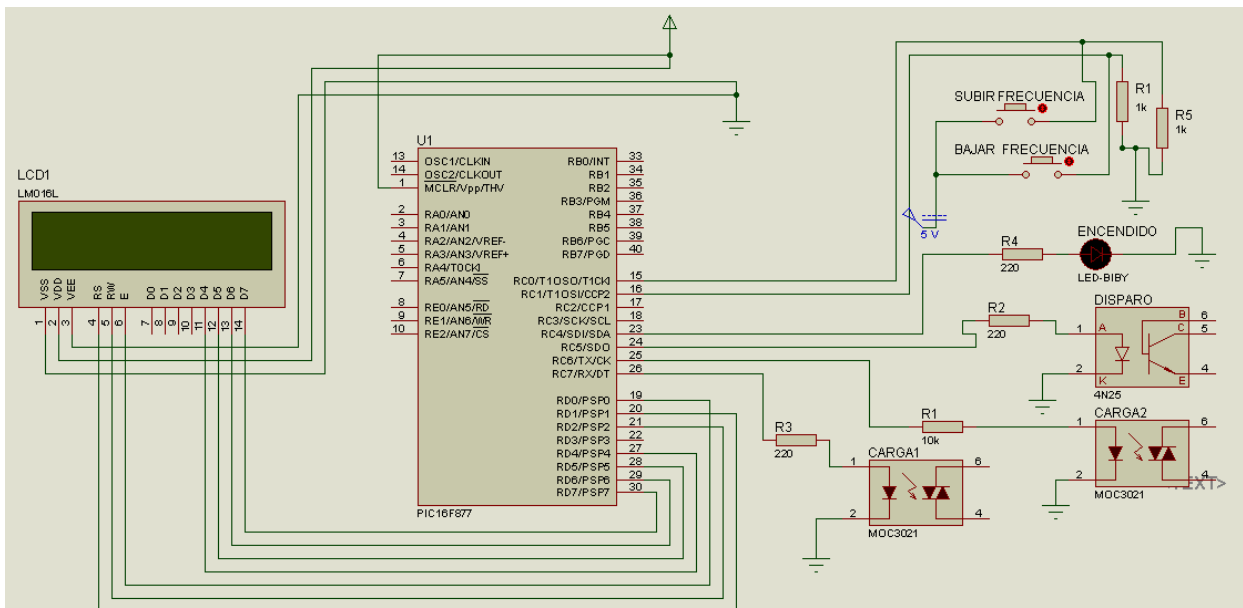


Figura 8 – Circuito digital de control de funcionamiento de la lámpara flash de Xe.

La tarea prevista que debe cumplir el programa es el de permitir que el dispositivo láser dispare en frecuencias en el rango de 1 – 10 Hz. Para ello se programaron temporizaciones de 15 ms que forman los ciclos de trabajo de la señal de carga y disparo (Figura 9). Los 15 ms corresponden al tiempo asignado a la señal de disparo y a los tiempos muertos entre señales y el restante pertenece a la señal de carga. Se eligió este periodo de tiempo basado en el tiempo que tarda el disparo de la lámpara es de aproximadamente 230 μ s, donde los 15 ms son suficiente para la transferencia total de la energía del bloque de capacitores a la lámpara durante el destello.

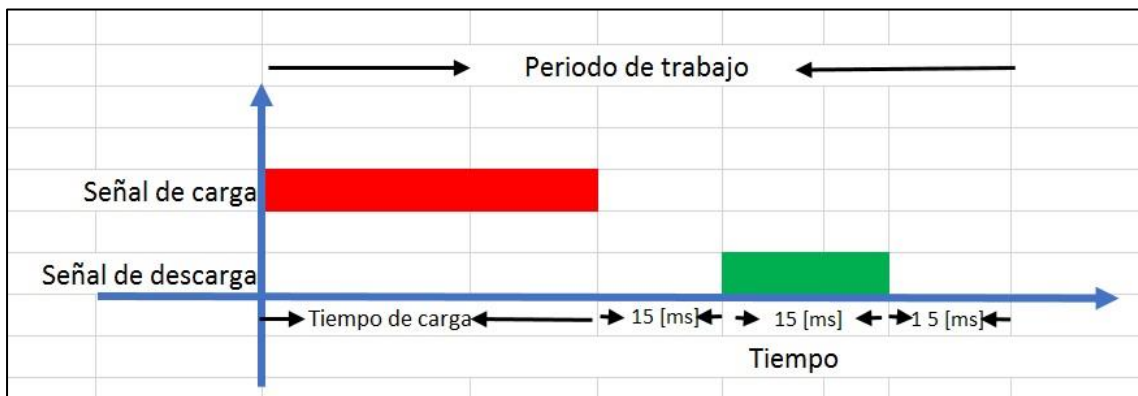


Figura 9 – Protocolo de tiempos de carga y disparo.

La Tabla 1 muestra la energía del bloque de potencia de manera experimental, para cada frecuencia de disparo en los tiempos establecidos por el microcontrolador:

TABLA 1 - PARÁMETROS DE ENERGÍA Y POTENCIA MEDIDOS EN DISTINTAS FRECUENCIAS DE OPERACIÓN

Frecuencia	Tiempo de carga [ms]	Capacitancia[μ F]	Voltaje [V]	Energía del bloque de potencia [J]
1	955	917	392	70,45
2	455	917	392	70,45
3	290	917	392	70,45
4	205	917	392	70,45
5	155	917	392	70,45
6	125	917	392	70,45
7	95	917	392	70,45
8	80	917	392	70,45
9	70	917	392	70,45
10	55	917	382	66,90

La energía del bloque de potencia se calculó utilizando la ecuación (5), donde identifica la energía del bloque de potencia con el dato fijo de la capacitancia de 917 μ F y midiendo los distintos voltajes en función del tiempo de carga para cada frecuencia de disparo.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se implementó una fuente de alimentación electrónica, basada en un circuito de ionización de corriente simmer, aplicado a una lámpara flash con Xe, para la excitación de un cristal del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺, el láser pulsado, gracias a este esquema de alimentación y control electrónico puede trabajar hasta una frecuencia de 10 Hz. El sistema en operación, con una frecuencia entre 1 a 9 Hz, logra cargar a los condensadores de potencia, la energía máxima permitida por el circuito de alimentación (7,45 J), solo en la frecuencia de trabajo de 10 Hz se consigue una energía inferior correspondiente a 66,9 J.

Se desarrollaron y construyeron los transformadores trigger y el que corresponde a la fuente de DC para el circuito de ionización de corriente simmer, se diseñó e implementó un protocolo de control temporal para la carga y disparo del sistema láser basado en un microcontrolador del tipo 16F877A PIC, que permite conmutar de manera adecuada la carga de los condensadores de potencia y el disparo del láser de manera alternada, bajo el régimen de corriente de ionización simmer.

Para el control de la conmutación se utilizó un tiristor SCR del tipo C157MX168, de alta potencia de la marca General Electric que soporta corrientes pico de 1800 amperios y 600 VDC, la corriente continua con la que opera es de 110 amperios y el voltaje máximo con la que opera el terminal de control es de 3 V.

Se planifica en una segunda fase la implementación de un circuito de conmutación de corriente directa (DC-DC), que permiten la obtención de valores de voltajes altos, sin la necesidad de transformadores voluminosos, lo cual permitirá reducir el tamaño de la fuente de alimentación del sistema diseñado.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. V. Antsiferov and G. I. Smirnov, *Physics of Solid-State Lasers*, Cambridge: CISP, Cambridge International Science Publishing Ltd., 2005.
- [2] T. H. Maiman, "Stimulated Optical Radiation in Ruby," *Letters to Nature*, vol. 187, pp. 493-494, 1960.
- [3] T. H. Maiman, «Optical and Microwave-Optical Experiments in Ruby,» *Phys. Rev. Lett.*, vol. 4, n° 11, pp. 564-566, 1960.
- [4] PerkinElmer, «High Performance Flash and Arc Lamps,» 2015. [En línea]. Available: <http://laser-caltech.web.cern.ch/laser-caltech/report/Flash%20lamp%20Eg&G.pdf>. [Último acceso: diciembre 2015].
- [5] Heraeus, «The lamp book The Heraeus Noblelight technical reference book for arc and flash lamps,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.dmlittle.eclipse.co.uk/lasers/documentation/Heraeus%20Noblelight%20Flashlamp%20Catalog.pdf>. [Último acceso: Noviembre 2015].
- [6] R. F. Steinkraus Jr., "Ionization Tube Simmer Current". USA Patent 5,373,215, 13 Dec. 1994.
- [7] O. Ormachea, «Diseño y construcción de un laser solido pulsado del tipo YAG: Nd⁺⁺⁺,» *Revista Boliviana de Física*, vol. 13, n° 13, pp. 54-57, 2007.

- [8] O. Ormachea, «Diseño y construcción de un prototipo funcional de generación óptica cuántica (laser),» *Investigación & Desarrollo*, vol. 7, pp. 71-82, 2007.
- [9] O. Ormachea y M. Delgado, «Diseño y construcción de un láser pulsado portátil del tipo YAG: Nd+++ para aplicaciones LIBS,» *Investigación & Desarrollo*, vol. 11, pp. 85-97, 2011.
- [10] O. Urquidí y O. Ormachea, «Desarrollo de un sistema de análisis fisicoquímico, basado en espectroscopia de emisión atómica inducida por radiación láser,» *Investigación & Desarrollo*, vol. 13, pp. 5-12, 2013.
- [11] O. Ormachea, O. Urquidí and D. Casazola, "Development of a portable low-cost LIBS system," *Proc. of SPIE 8th Ibero American Optics Meeting/11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications*, pp. 87851D-87851D-8, 2013.
- [12] O. Zvelto and D. C. Hanna, *Principles of lasers*, New York and London: Plenum press New York and London, 1982.
- [13] B. Frank y A. Frungel, *Sparks and laser pulses*, New York: Academic Press, 1980.
- [14] E. Rodney, "Application Guide Snubber Capacitors," [Online]. Available: <http://www.cde.com/resources/catalogs/igbtAPPguide.pdf>. [Accessed Dec 2015].
- [15] E. Fitzgerald, *Máquinas Eléctricas*, México: Mc Graw Hill, 2004.
- [16] J. F. Mora, *Máquinas Eléctricas*, Madrid: Mc Graw-Hill / Interamericana, 2003.
- [17] O. Ormachea y W. Morrison, «Diseño y construcción de un láser de nitrógeno,» *Investigación & Desarrollo*, vol. 10, pp. 88-97, 2010.