

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LÁSER PULSADO PORTÁTIL DEL TIPO YAG:Nd⁺⁺⁺ PARA APLICACIONES LIBS

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PORTABLE PULSED LASER TYPE YAG:ND⁺⁺⁺ FOR LIBS APPLICATIONS

Omar Ormachea Muñoz y Mónica Delgado Borda*

Centro de Investigaciones Ópticas – CIO

Carrera de Ing. en Electrónica y Telecomunicaciones*

Universidad Privada Boliviana

oormachea@upb.edu

(Recibido el 10 de octubre 2011, aceptado para publicación el 12 de diciembre 2011)

RESUMEN

En el presente artículo se describe el diseño y construcción de un láser portátil y pulsado del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺ para aplicaciones LIBS. La fuente de alimentación del sistema está basada en un bloque de potencia formado por un circuito triplicador de voltaje y 6 capacitores de 330 μ F/ 200 V cada uno, éste funciona con 4 baterías recargables de celular de ión de Li y un inversor de 12 VDC a 220 VAC. Se equipo está provisto de un sistema de control electrónico digital que permite variar la frecuencia y energía del disparo. Finalmente, la cavidad resonante está conformada por un cristal YAG:Nd⁺⁺⁺, una lámpara de xenón, 2 espejos dieléctricos y un cristal del tipo LiF para la modulación Q-switch pasiva. El tiempo entre disparos puede variar entre 4 y 7 segundos, mientras que la energía almacenada en el bloque de potencia puede variar entre 17 y 14 joules. La longitud de onda de emisión láser es de 1064 nm, perteneciente al infrarrojo cercano. El peso del equipo es aproximadamente de 3 Kg y las dimensiones son 20x24x10 cm.

ABSTRACT

This article describes the design and construction of a portable, pulsed laser of type YAG:Nd⁺⁺⁺ for LIBS applications. The power source of the system is based on a voltage block created by a voltage tripler with six 330 μ F/ 200 V capacitors, 4 rechargeable Li batteries and a 12VDC/220 VAC inverter. The instrument is equipped with a digital electronic control system that permits variations in the frequency and energy of the laser pulses. Finally, the resonance cavity is made with a YAG:Nd⁺⁺⁺ crystal, a xenon lamp, two dielectric mirrors and a LiF crystal that modulates a passive Q-switch. The time between pulses varies between 4 and 7 seconds while the energy stored in the potential block ranges between 14 and 17 Joules. The wavelength emitted by the laser is 1064 nm (NIR). The entire instrument weighs 3 kg and measures 20x24x10 cm.

Palabras Clave: Láser Pulsado, Opto-electrónica, Láseres, LIBS.

Keywords: Pulsed Laser, Opto-Electronic, Lasers, LIBS.

1. INTRODUCCION

LASER, que viene del acrónimo *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, es una fuente de luz distinta de las convencionales por sus propiedades físicas: coherencia, lo cual implica mono-cromaticidad, estabilidad en frecuencia, direccionabilidad y la posibilidad de focalizar un haz en áreas muy pequeñas obteniendo intensidades de emisión asombrosas.

Estas características hicieron que los láseres se constituyeran en una herramienta muy importante en diferentes áreas como ser la medicina, las telecomunicaciones, la industria, la ingeniería civil y la investigación científica. El primer láser construido en el diapason óptico fue diseñado por T. H. Maiman en el Hughes Research Laboratories en 1960, *láser de rubí* [1, 2].

Existen diversos tipos de láseres dependiendo del material de fabricación. Un láser del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺ utiliza el dopaje de iones de neodimio en cristales de óxido de ytrio y aluminio (Nd:Y₃Al₅O₁₂) como medio activo sólido. Los primeros trabajos en esta dirección fueron dados por Snitzer [3], quien en 1961 disparó el primer láser activado con iones de Nd⁺⁺⁺. La emisión laser producida por cristales activados con Nd⁺⁺⁺ generan radiación coherente con una longitud de onda de 1064 nm, perteneciente al infrarrojo cercano. Las potencias de emisión típicas de este tipo de láseres pulsados, son del orden de MW/cm² en el modo de Q-switch y del orden de GW/cm² en el modo de sincronización de los modos del resonador láser [4, 5].

Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) es una técnica de espectro-química que consiste en el análisis cuantitativo de la composición de los materiales, sin importar el estado físico en el que se encuentren [6, 7]. En esta tecnología, una de las herramientas fundamentales es el dispositivo láser que produce el plasma inducido, a partir de este último se obtiene la información de la composición del material, analizando su espectro de emisión atómica, que es

recogido por un sistema óptico y direccionado a un espectrómetro. Esta metodología de medición y análisis de muestras, presenta varias ventajas respecto a otras: no es invasiva al objeto de estudio, es fácilmente portable, puede transportarse al campo de trabajo y no hay necesidad de preparar la muestra antes de su análisis.

La tecnología LIBS se puede aplicar en diferentes áreas como la arqueología, análisis de pinturas, análisis de componentes de diferentes planetas, análisis de las inclusiones en el acero, análisis de la escoria en la metalurgia secundaria y otros. Con la miniaturización de los componentes y el desarrollo de los sistemas portátiles de bajo consumo de energía, esta tecnología es usada por grupos como la ESA, la NASA para misiones como por ejemplo la exploración de Marte [8].

Dentro de las líneas de investigación del Centro de Investigaciones Ópticas (CIO) de la Universidad Privada Boliviana, se encuentra el desarrollo de tecnología láser para diversas aplicaciones. En este centro, el año 2007 se desarrolló el primer dispositivo láser boliviano [9, 10]. Una de las aplicaciones definida en el centro, es el desarrollo de tecnología LIBS, que por sus características de utilización, requiere la construcción de un sistema portátil que comprende un dispositivo láser pulsado de alta potencia de dimensiones pequeñas y bajo peso. La construcción de un láser de este tipo que se describe en este artículo, se constituye en un nuevo desarrollo tecnológico caracterizado por una disminución de costos, haciendo que esta tecnología sea accesible a usuarios con poco poder económico.

2. MARCO TEORICO

A continuación se hará una explicación del principio de funcionamiento del sistema láser del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺ y otras herramientas necesarias para su desarrollo.

▪ Principio de funcionamiento general de un láser

Un láser se basa en un principio de la mecánica cuántica que permite la amplificación de la luz por emisión inducida o estimulada de radiación [11]. Esta teoría indica que los átomos presentan diferentes niveles energéticos discretos. Como los materiales están formados por moléculas, y éstas por átomos, cuando un material absorbe energía, cada átomo también lo hace, provocando un salto de los átomos de un nivel energético fundamental a otro estado excitado. La ecuación (1) cuantifica esta energía mediante la ecuación de Planck:

$$\Delta E = E_n - E_m = \nu h \quad (1)$$

donde ν es la frecuencia, ΔE es la variación de energía y h es la constante de Planck (6.626×10^{-34} [J.s]). De manera natural, los átomos tienden a volver al estado fundamental y durante este proceso de desactivación, éste transfiere la energía absorbida a otros átomos en una colisión a través de la emisión de un fotón con una longitud de onda determinada por la ecuación de Planck [12].

En general, esta emisión de fotones puede ser espontánea cuando la absorción no está controlada y la emisión es aleatoria, o estimulada cuando el fotón emitido tiene las mismas características que la onda de luz que interaccionó con el átomo, la polarización, en otras palabras, el fotón emitido reforzará al incidente.

Para asegurar la amplificación de la luz, en lugar de la atenuación mediante una emisión estimulada, es necesario contar con la inversión de población de átomos de un nivel inferior a otro superior, es decir, el número de átomos en el nivel n debe ser mayor al nivel m , $N_n - N_m > 0$ para el nivel $m < n$. El proceso de *inversión de población* se lo conoce como *bombeo* del medio activo.

Esquemáticamente, el láser está conformado por tres partes importantes: el **medio activo**, que es el proporciona los átomos, iones o moléculas en niveles adecuados para permitir la producción de luz amplificada; la **fente de energía**, necesaria para excitar el medio activo por alguno de los diferentes métodos de bombeo; y finalmente, la **cavidad resonante**, en la cual se produce la amplificación de la luz.

▪ Generación de pulsos o pulsada

El modo de funcionamiento de un láser puede ser de dos tipos: continuo (CW) o pulsado. Existen diversas aplicaciones cuando se trabaja en modo pulsado, donde la energía de cada pulso es *encapsulada* en un pequeño intervalo de tiempo, haciendo que la potencia pico se incremente de manera dramática.

Un láser pulsado puede trabajar en tres modos de operación: Régimen de generación libre, tiempo de duración del pulso $\tau \approx 10^{-6}$ s; Régimen de modulación del factor de calidad (pasivo y activo), tiempo de duración del pulso $\tau \approx 10^{-9}$ s y, por último, el régimen de sincronización de los modos del resonador óptico, tiempo de duración del pulso

$\tau \approx [10^{-12} s - 10^{-18} s]$, en este último régimen de trabajo, fácilmente se pueden alcanzar fantásticas potencias en cada pulso, del orden de $P \approx 10^{12} W$ [13, 14].

En este trabajo, el resonador óptico del dispositivo láser se diseñó para que trabaje en el régimen de modulación del factor de calidad *Q-switch* pasivo. El pulsado por conmutación del factor Q, consiste básicamente en la introducción de un obturador de conmutación rápida dentro del resonador. Cuando el obturador está cerrado y se inicia el bombeo, toda la radiación que se genera en el medio activo se pierde al ser absorbida por el obturador. De esta manera, se obtienen valores muy elevados de inversión de población que va aumentando mientras sigue el bombeo, pues no disminuye por emisión estimulada al no existir radiación electromagnética que escape del resonador óptico. Cuando se abre el obturador, se tiene una situación de alta ganancia debido a la gran inversión de población, generando pulsos de alta potencia y corta duración.

Existen varios tipos de obturador: moduladores electro-ópticos, moduladores acusto-ópticos y absorbentes naturales. Este último utiliza materiales que tienen la propiedad de absorber la radiación que se genera en el medio activo hasta que sobrepasan un valor de energía absorbida por encima de la cual el material se vuelve transparente. Una vez saturado el absorbente, es necesario interrumpir el bombeo para devolverlo a su estado original. Un ejemplo de este tipo de obturador es el cristal LiF, cuyas propiedades físicas absorbentes hacen de este cristal idóneo para aplicaciones *Q-switch* [15].

▪ Circuito de formación del pulso

Un láser sólido pulsado del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺ consta principalmente de tres partes: El sistema electrónico y de bombeo óptico, la cavidad resonante y el sistema de enfriamiento. El bombeo óptico del sistema está compuesto por una lámpara flash (medio gaseoso: Xenón). Puede usarse lámparas flash con Kriptón, ya que el espectro de emisión de ambos gases tiene picos muy cercanos a los picos de absorción del cristal YAG dopado con iones de Nd⁺⁺⁺.

El circuito básico general de manejo de una lámpara pulsada se muestra en la Figura 1 (no se incluye las resistencias del circuito e inductancias).

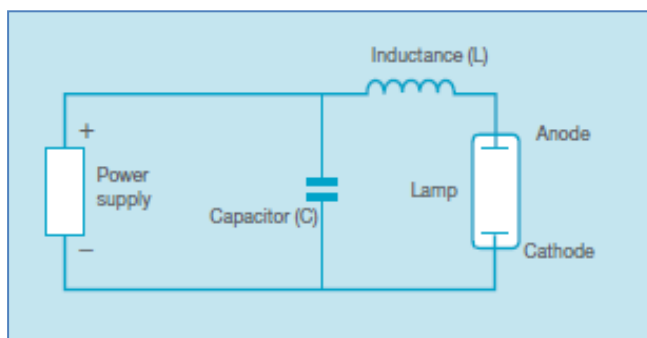


Figura 1 – Circuito básico de la red LC para el disparo de la lámpara.

Cuando la lámpara no está ionizada tiene una impedancia muy alta, del orden de $10^7 \Omega$, por este motivo, inicialmente toda la corriente de la fuente de alimentación circula hacia el capacitor C. Si el voltaje sobre el capacitor alcanza el valor de ruptura de la lámpara, la ionización del gas de la lámpara empieza a ocurrir y su impedancia empieza a bajar. Un camino de baja impedancia aparece entre los electrodos de la lámpara mientras más átomos sean ionizados. La corriente fluye del capacitor hacia la lámpara y dicha impedancia empieza a bajar, alcanzando valores de 1Ω o menos. Si suficiente carga está disponible, el plasma del gas ionizado llena completamente la cavidad. Eventualmente, toda la energía almacenada en la fuente de alimentación empieza a cargar el capacitor y de esta manera el proceso continúa [16].

En la práctica, las lámparas pulsadas son manejadas por una red formada por un capacitor y una inductancia. Las ecuaciones que describen esta red son:

$$E_0 = \frac{CV^2}{2} \quad (2)$$

$$\tau = \sqrt{LC} \quad (3)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4)$$

$$t = 3\tau \quad (5)$$

donde E_0 (J) es la energía almacenada en el capacitor, C (F) es capacitancia del capacitor, L (H) la inductancia, V (V) el voltaje inicial en el capacitor, Z_0 (Ω) la impedancia, τ (s) la constante de tiempo del circuito y t (s) la longitud del pulso en segundos (a 1/3 de la altura de pico).

Con el uso de las anteriores ecuaciones, el circuito de una lámpara puede ser diseñado para satisfacer los requerimientos de la lámpara. Normalmente, el proveedor especifica la energía y el ancho del pulso, de esta manera se puede encontrar los requerimientos de C y L . La potencia media de entrada a la lámpara puede calcularse con la ecuación (6),

$$P = E_0 f \quad (6)$$

donde f es la repetición del pulso medido en Hertz.

▪ Tipos de disparo

Las lámparas de arco requieren un pulso de disparo (*trigger*) de alto voltaje, para causar una ionización inicial del gas. Este pulso es generalmente de 10 a 30 kV con un ancho de pulso de algunos microsegundos. Usualmente, se aplica a la lámpara uno de los siguientes métodos: en serie, paralelo o disparo externo, Figura 2.

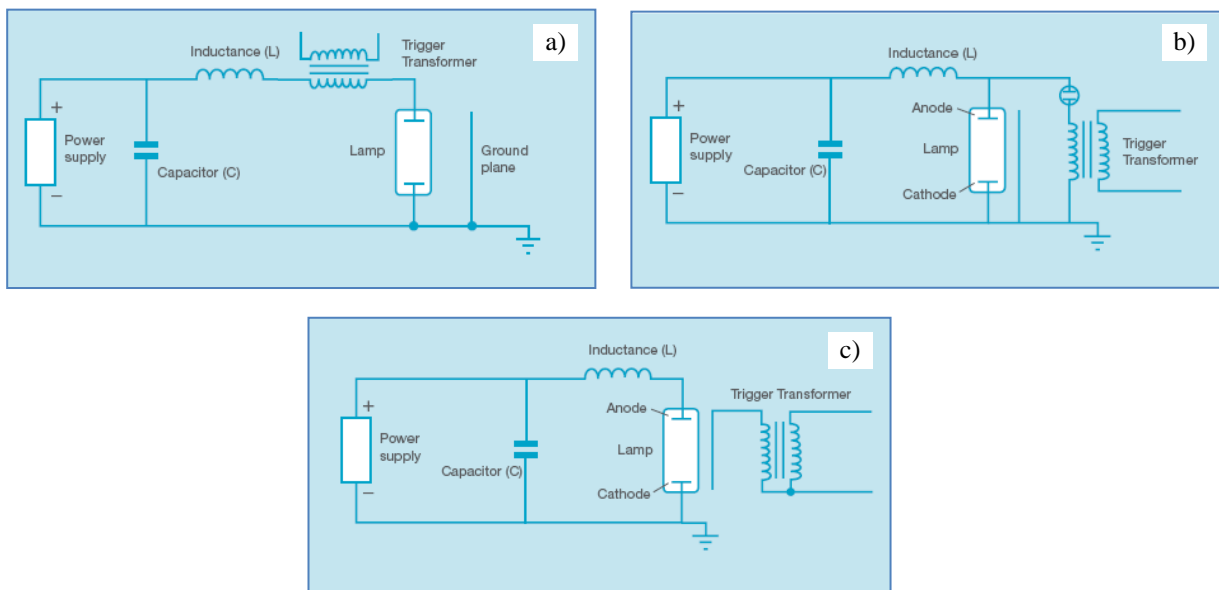


Figura 2 – Esquemas de disparo: a) En serie, b) En paralelo, c) Externo.

▪ Láser del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺

El láser del tipo YAG: Nd⁺⁺⁺ responde a un esquema de bombeo de 4 niveles energéticos para la inversión de la población del medio activo, Figura 3. Este tipo de láseres sólidos pueden ser bombeados ópticamente con diodos láser o lámparas flash. El bombeo óptico a través de lámparas flash es posible gracias a la absorción en la región espectral cerca a los 800 nm y las características del esquema de 4 niveles. La longitud de onda de emisión del YAG:Nd más común es de 1064 nm, a partir de esta longitud de onda se puede obtener diferentes armónicos (532, 355 y 266 nm) a través del doblado, triplicado o cuadruplicado de la frecuencia, utilizando cristales no-lineales del tipo KDP o DKDP. Otras líneas de emisión de este medio activo están caracterizadas por las siguientes longitudes de onda 946, 1123, 1319, 1338 y 1444 nm [17]. En el caso de la transición a 946 nm, el sistema se comporta como un sistema de 3 niveles energéticos, requiriendo mayores intensidades de bombeo óptico. Algunas de estas líneas son muy débiles, como la de 1123 nm, haciendo que la eficiencia de la generación láser sea muy difícil de obtener.

La concentración típica del dopado del cristal YAG con los iones de Nd es alrededor del 1%, concentraciones de dopaje altas, pueden traer algunas ventajas como la reducción de la longitud del bombeo óptico, sin embargo, altas concentraciones pueden influir en el tiempo de vida de los niveles energéticos superiores [17].

En el caso de implementarse lámparas flash para el bombeo óptico de excitación de los niveles superiores, se utiliza comúnmente lámparas xenón o de kriptón, debido a que sus picos de emisión coinciden con los picos de absorción del cristal. En el caso específico de este trabajo, se utilizó una lámpara de xenón. En la Figura 4 se observa los espectros de emisión de la lámpara de xenón y los picos de absorción del medio.

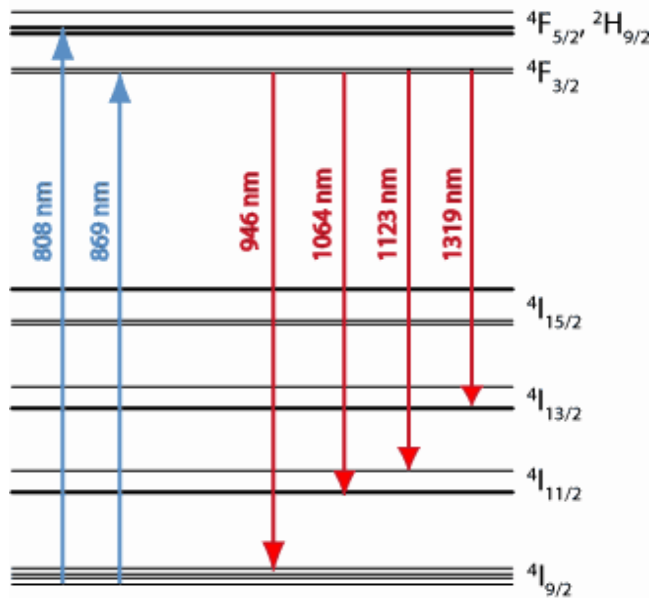


Figura 3 – Estructura de los niveles energéticos para el YAG:Nd⁺⁺⁺.

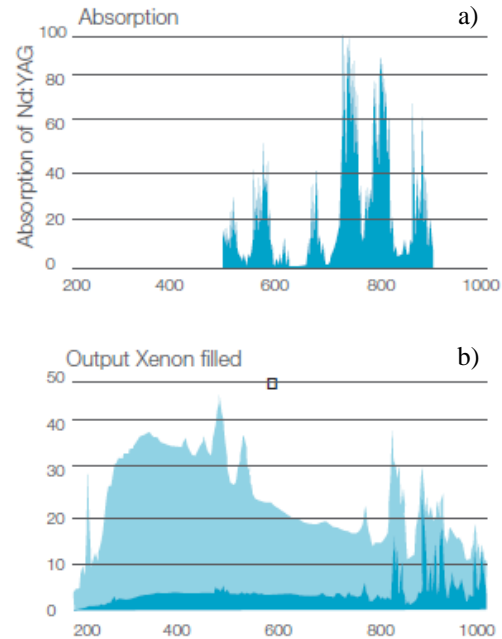


Figura 4 – Espectros de absorción del medio activo (a) y emisión de la lámpara de xenón (b).

3. DESARROLLO DEL LÁSER

En la Figura 5 se muestra un esquema detallado de los cuatro bloques importantes que se desarrollaron. En esta figura se observa la secuencia de alimentación a través de baterías, el sistema inversor que convierte la corriente DC a AC, posteriormente a través de un quintuplicador de voltaje, se transforma esta corriente, elevándola al voltaje necesario para inyectar energía al bloque de potencia. Se tiene el bloque de control basado en un controlador PIC y, finalmente, el cabezal láser. A continuación se describe en detalle de cada uno de los elementos que conforman este esquema de bloques.

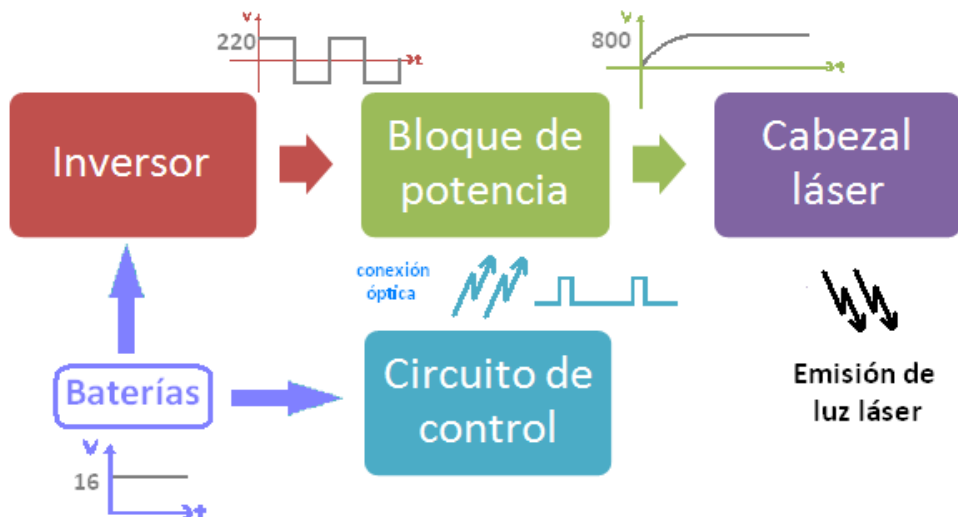


Figura 5 – Esquema de bloques.

▪ Baterías

Como fuente de alimentación del sistema, se utilizaron 4 baterías de celular BL-5C, del tipo Li-ion de 3,7 V cada una, y poseen las siguientes razones:

- Son recargables
- Viene en paquete fino y ligero.
- La capacidad es de 950 mAh
- Permiten descargas profundas
- Tienen muy poco efecto memoria, es decir, no disminuye la capacidad de las baterías por cargas incompletas, por lo tanto, puede cargar energía en cualquier momento.

El voltaje entregado por las baterías en serie es alrededor de 16 V cuando están completamente cargadas. El inversor admite como máximo 15 voltios en su entrada, es por esto que se vio la necesidad de armar un circuito regulador que entregue constantemente 12 VDC. La Figura 10 muestra el circuito diseñado y armado.

El regulador integrado LM7812 entrega como máximo 1 A, es decir 12 W. Para poder utilizar al máximo la potencia del inversor, se utilizaron 2 transistores en la configuración que se muestra en la Figura 6 en el circuito regulador de voltaje.

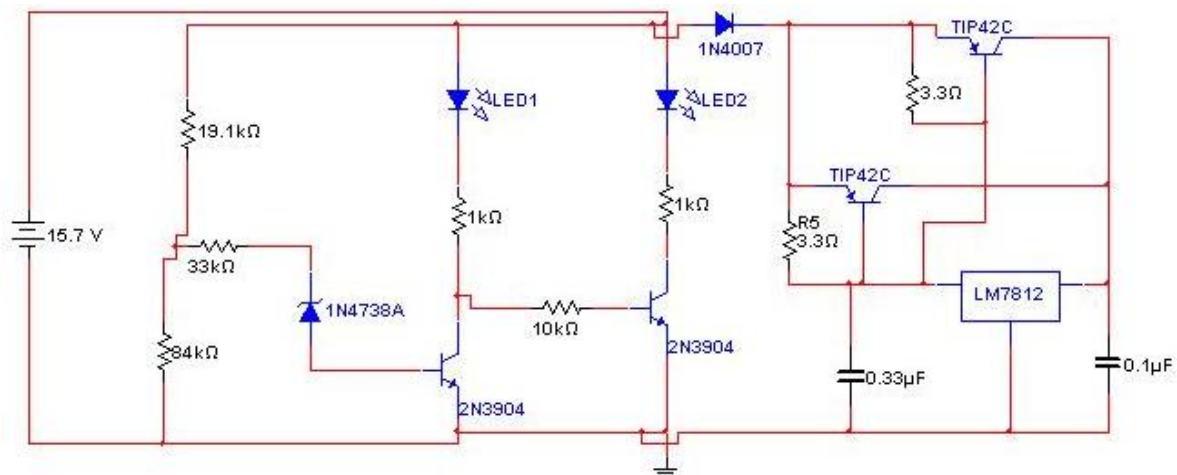


Figura 6 – Circuito regulador de voltaje.

A esto se añadió un sistema que pueda detectar la batería baja. Se la configuró para que se encienda cuando el voltaje de las baterías sea menor a 15.3 V. En la figura 7 se muestra el montaje del sistema.



Figura 7 – Fotografía del regulador de voltaje.

▪ **El inversor**

Uno de los problemas más delicados cuando se trabaja con bloques de potencia, es que se necesitan tensiones elevadas, esto se logra con el uso de transformadores y, en consecuencia, se debe trabajar con corriente alterna. En el diseño del trabajo realizado, fue necesaria la inclusión de baterías recargables para que el sistema láser sea portátil. Para poder transformar la corriente, como se menciona arriba, a los voltajes adecuados, se diseñó e implementó un inversor que permite transformar la corriente VDC en VAC y, de esta manera, poder elevar la tensión mediante un transformador.

El arreglo de las baterías de celular entrega un voltaje 7.4 V, en base a este parámetro, se utilizó un multivibrador CD4047 en configuración *push - pull* [18] y un par de transistores *mosfet* para lograr la etapa de oscilación y, de esta manera, obtener corriente alterna a partir del bloque de baterías, posterior a esta etapa se utilizó un transformador de 6- 0- 6 a 220 V/ 300 mA, cuya potencia es igual a 1.8 W.

En esta etapa previa, el sistema funcionó muy bien, sin embargo, el tiempo de carga de los capacitores de potencia fue muy elevado, alrededor de 55 s, a una tensión de 780 V. El parámetro temporal está ligado a la potencia del inversor, siendo el transformador el limitador principal del sistema. A mayor potencia, mayor tamaño (transformador), y por lo tanto mayor peso, es por esta razón que se decidió utilizar un inversor comercial 12 VDC – 220 VAC de 150 W de potencia nominal. De esta manera, se consiguió reducir el tiempo de carga de los capacitores a aproximadamente 4 segundos.

▪ **El bloque de potencia**

El diseño para el bloque de potencia está definido por los parámetros energéticos de la lámpara flash de xenón. La lámpara que se usó para el proyecto tiene las siguientes dimensiones: 5 mm de diámetro, 84 mm de longitud y 36 mm de longitud del arco y puede trabajar con un voltaje máximo de 900 VDC.

En la Figura 8 se tiene el circuito de potencia, diseñado para la lámpara descrita. En la entrada se tiene un voltaje de 220 VAC obtenida del bloque de baterías y después del inversor de 150 W de potencia. Para elevar el voltaje, se diseñó un circuito triplicador de voltaje, este trabaja con capacitores de 2,2 μ F y 400 V. El bloque de potencia está formado por 6 capacitores en serie de 330 μ F y 200 V cada uno, formando una capacitancia total de 55 μ F y un máximo de voltaje de 800 V, obteniéndose una energía máxima de disparo de aproximadamente 17 Joules.

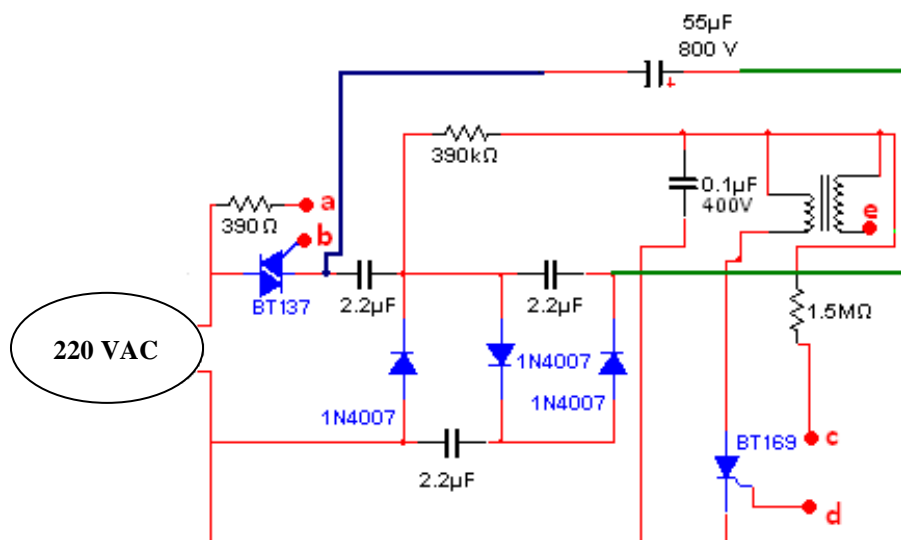


Figura 8 – Circuito de potencia.

Este diseño cuenta con características importantes añadidas para el control de carga y de disparo:

- El uso de un SCR BT169D, interruptor electrónico, para controlar el *trigger* (en la Figura 8 representada por un transformador) y, por lo tanto, el disparo de la lámpara. Los puntos **c** y **d** indican la conexión con el sistema de control.
- El uso de un *triac* BT137, controlado digitalmente por un microcontrolador PIC (ver circuito de control) a través de los puntos **a** y **b**, este elemento permite controlar el intervalo de tiempo que se requiere alimentar a todo el

bloque de potencia y la posibilidad de desconectar la alimentación en el momento de disparo de la lámpara. El punto e de la Figura 8 indica la conexión con el *trigger* externo del cabezal.

Para optimizar el proceso, es necesario controlar el tiempo de disparo de la lámpara flash, debiendo obtenerse un ancho de pulso de alrededor de 230 μs . El tiempo de decaimiento del nivel energético ${}^4F_{3/2}$ a los niveles inferiores I (${}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{11/2}$, ${}^4I_{13/2}$, etc.) del YAG:Nd, denominado el canal láser, es del orden de $\tau \cong 230 \mu\text{s}$ [13], Figura 9.

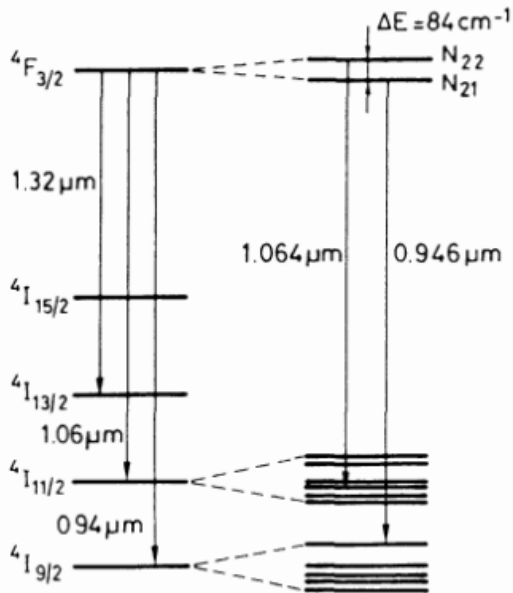


Figura 9 – Niveles energéticos relevantes para la transición láser del YAG:Nd ($\lambda = 1064 \text{ nm}$).



Figura 10 – Fotografía del bloque de potencia.

Como parte del circuito, se debe incluir una inductancia en serie al condensador de potencia (55 μF , 800 V) para controlar el tiempo de disparo de la lámpara flash. De acuerdo a las ecuaciones de la teoría, se tiene:

$$\tau = \frac{t}{3} = \frac{230 \mu\text{s}}{3} = 76.67 \mu\text{s} \quad (7)$$

$$L = \frac{\tau^2}{C} = \frac{(76.67 \mu\text{s})^2}{55 \mu\text{F}} = 106.86 \mu\text{H} \quad (8)$$

entonces la inductancia necesaria para lograr el ancho de pulso requerido es de aproximadamente 107 μH .

▪ El trigger

Para la ionización inicial del gas de la lámpara flash (xenón), se decidió usar un circuito con un *trigger* externo, de las tres configuraciones que se tienen para este tipo de bombeo óptico.

El transformador utilizado para el *trigger*, debía de cumplir con ciertos requisitos como son bajo peso y dimensiones pequeñas. Para ello se eligió un elemento de 1.6 cm x 0.8 cm x 0.8 cm, como se muestra en la Figura 11. Este tipo de transformadores tienen un núcleo especial y trabajan a frecuencias elevadas, en este caso particular, se tiene una frecuencia de trabajo igual a 177 KHz y un factor de conversión de voltaje igual a 1:45 en el secundario. Un factor importante en la configuración elegida es que no se necesitan valores altos en la corriente, en este caso, este parámetro está en el orden de mA, haciendo posible la utilización de este tipo de transformadores, que están compuestos por envolturas de cables muy delgados que permiten la construcción de estos elementos tan pequeños.

El voltaje necesario para la ionización del gas en la lámpara flash es alrededor de 10 KV. Se calculó que se necesita aproximadamente 220 V en el primario para obtener ese resultado en el secundario. Para lograrlo, en el circuito de disparo se conectó una resistencia de 390 K Ω como divisor de voltaje y limitador de corriente, (ver Figura 8), a la salida

del elevador de tensión (triplicador de voltaje) y en serie con un capacitor de 0.1 μ F y 400 V que se utilizó como elemento de almacenaje de energía conectada al primario del transformador *trigger*.



Figura 11 – Fotografía del transformador *trigger*.

▪ El cabezal láser

El cabezal láser está conformado por una estructura metálica que contiene al cristal, la lámpara flash, un elemento cerámico reflectivo para el uso óptimo de la radiación de bombeo de la lámpara, un cristal del tipo LiF para el modo de trabajo de *Q-switch* pasivo y los espejos dieléctricos (R_1 -100%, R_2 -20%) para $\lambda = 1064$ nm.

En la Figura 12 se puede apreciar el cabezal laser que no requiere refrigeración forzada por agua, este elemento está diseñado para trabajar con una frecuencia no mayor a 1 Hz sin necesidad de refrigeración. En la fotografía se aprecian los cables de alta tensión (rojo y negro) para la alimentación de la lámpara flash, el cable blanco es el que va al transformador *trigger*.

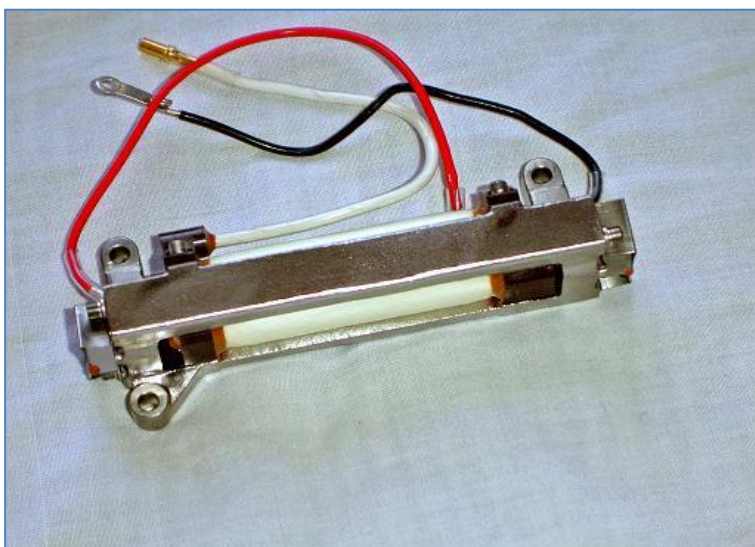


Figura 12 – Fotografía del cabezal laser y sus componentes.

Las características del cabezal láser son las siguientes:

- Medio activo:
 - Tipo: Barra YAG:Nd⁺⁺⁺ con extremos recubiertos con AR.
 - Diámetro del vástago: Alrededor de 4 mm.
 - Longitud de la barra: 50 mm.
 - Umbral de disparo: 7,5 J (con duración de pulso de 100 μ s) en el modo de generación libre.
- Lámpara:
 - Longitud de arco: 36 mm.
 - Diámetro externo: 5 mm, diámetro interno: 3 mm.

- Longitud: 84 mm.
 - Envoltura de la lámpara: Cuarzo.
 - Electrodo: Tungsteno sólido.
 - Mínimo voltaje: 300 V, Máximo voltaje: mayor a 1000V.
 - Energía recomendada de entrada para una duración de pulso de 230 μ s: 15 J a 900 V.
 - Trigger: electrodo externo para el trigger (alambre blanco).
- Elementos ópticos:
- Espejos ópticos fijos en ambos extremos..
 - Cavity reflectora: Espesa capa de polvo blanco en la parte exterior del tubo de flujo.
 - Longitud de la cavidad: 93 mm.
 - High reflector (HR): 12 mm de diámetro por 5 mm de espesor. Está ubicado normalmente al final del elemento Q-switch.
 - Acoplador de salida (Output Coupler): 12 mm de diámetro por 5 mm de espesor. No está ubicado al final del elemento Q-switch.
 - Elemento Q-switch pasivo: Es el tercer elemento adyacente al extremo final de la varilla del HR.
- Configuración física del cabezal: Las dimensiones totales son 25x25x105 mm.

La luz láser que emite este dispositivo a 1064 nm, entra en la clasificación de láser Clase IV, por lo cual es necesario tomar precauciones a la hora del manejo del mismo.

▪ El circuito de control

Se desarrolló un sistema de control digital, donde se utilizó un controlador PIC 16F877A. La ventaja de utilizar este elemento es que permite incorporar nuevas funcionalidades y poder controlar varios puertos de salida.

Un fenómeno físico importante de analizar es que en el momento en que ocurre el disparo de la lámpara, como su impedancia disminuye drásticamente hasta ordenes de 1Ω , ésta actúa prácticamente como un corto circuito, generando picos elevados de corriente hacia el lado de la fuente. Cuando se manejan grandes energías para disparar la lámpara, esta situación es crítica ya que puede llegar a dañar los diferentes componentes electrónicos, es por esto que se ve la necesidad de poder desconectar la fuente en el momento del disparo de la lámpara flash.

El hecho de utilizar el controlador PIC mencionado da además la facilidad de poder controlar la energía dirigida hacia la lámpara en el momento del disparo; para variar esta energía, se puede modificar directamente el valor del voltaje o el de la capacitancia. En este trabajo, se decidió variar el voltaje, para lo cual se eligió trabajar sobre el tiempo de carga de los capacitores, mediante un control digital de conexión y desconexión de la fuente de alimentación. De esta manera, la función del microcontrolador PIC se resume en la salida de 2 señales: una que controla el disparo *trigger* y la otra que controla la conexión y desconexión de la fuente de alimentación al circuito de potencia, Figura 13.

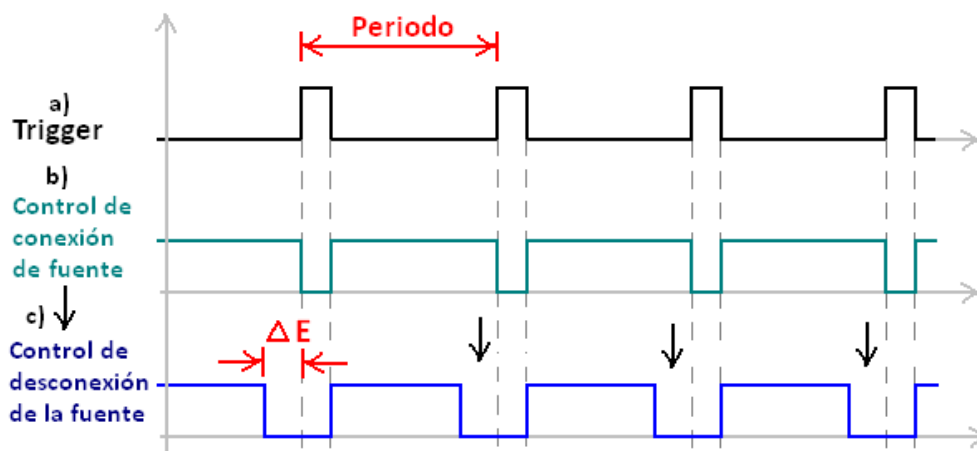


Figura 13 – Señales de salida del microcontrolador PIC, a) Control del trigger, b) Control - conexión de la fuente, c) Control-desconexión de la fuente y energía del pulso.

En el inciso (a) se indica la señal de salida que controla el disparo del *trigger*. Esta señal está relacionada con el SCR mediante un optoacoplador, variando el periodo de esa onda cuadrada, se varía la frecuencia de disparo de la lámpara flash y por ende del sistema láser.

La señal de control de conexión de la fuente (b) en su salida es inversa a la del *trigger*, es decir, mientras la señal del *trigger* está en posición *baja* (no dispara), la señal para la conexión de la fuente está en *alto*. Esto permite el flujo de corriente desde el inversor hacia el bloque de potencia, cargando así los capacitores.

En el momento en que la señal del *trigger* pasa a una posición *alta*, la señal de conexión de la fuente está en estado de desconexión y no permite el paso de corriente al bloque de potencia. Si la fuente de alimentación se desconecta antes de que los capacitores carguen a su valor máximo, el voltaje es inferior a su valor nominal máximo, por lo tanto, la energía almacenada también es menor.

Como se puede observar en el inciso (c), al modificar el tiempo en que la señal de salida de control de conexión de la fuente esté conectado "*alto*", se afecta directamente a la energía que puede ser almacenada en los capacitores de potencia. De esta manera, se diseñó el circuito digital teniendo 2 variables:

- El tiempo entre disparos del sistema láser.
- El tiempo de carga de los condensadores de potencia.

Para esto, se utilizaron 2 pulsadores conectados al controlador PIC, uno para ver las opciones (primero la energía: 17, 16 Joules, etc. y después la frecuencia: cada 4 segundos, cada 5 segundos, etc.) y el otro para aceptar la selección.

La retroalimentación para el usuario se da a través de una pantalla LCD, la cual muestra el menú de selección. En la Figura 14 se puede apreciar una parte del circuito digital armado (b).

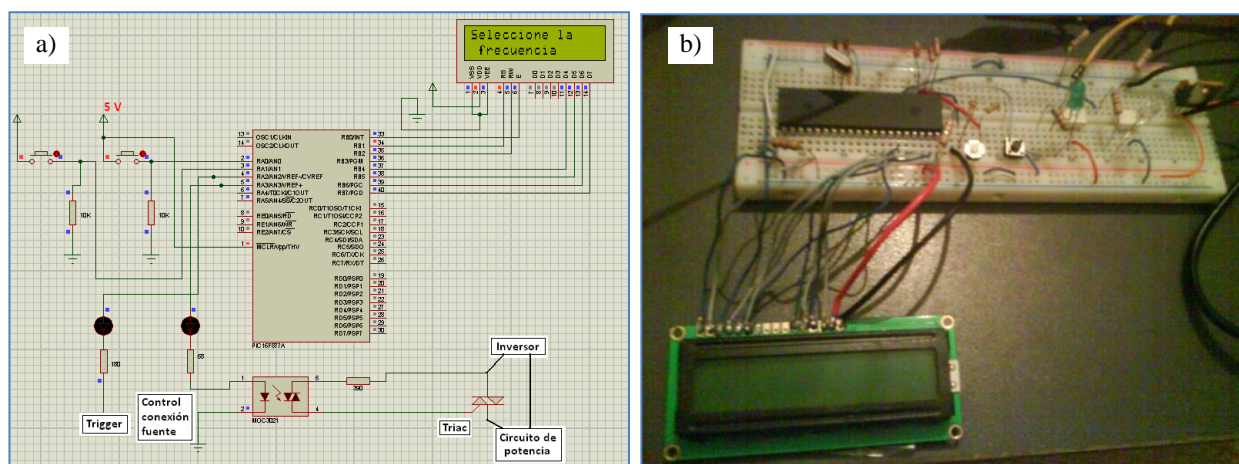


Figura 14 – Circuito digital de control de potencia y disparo (a), fotografía del control digital (b).

Los LEDs conectados a la salida de cada señal, en serie con el LED interno del opto-acoplador, sirven como señalizadores del buen funcionamiento del circuito.

Para encontrar el tiempo de conexión y desconexión de la fuente, necesario para variar la energía, se utilizó la ecuación (2). El tiempo que tarda en cargar los capacitores de potencia hasta cada valor de voltaje se calculó de manera empírica realizando pruebas experimentales.

Algo importante de mencionar es que la conexión entre la salida del controlador PIC y el circuito de potencia no debe hacerse de manera directa, debido a que la diferencia de voltajes que se maneja es demasiado grande y puede quemar los elementos sensibles (el microcontrolador). Es por esto que se utilizó una conexión óptica, mediante el uso de un optoacoplador.

En la Figura 15 se muestra una fotografía del láser portátil. Todos los bloques fueron dispuestos dentro de una caja sólida de metal conformando así el láser pulsado y portátil del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺, las dimensiones del equipo construido son de 20x24x10 cm y tiene un peso aproximado de 3 kg.



Figura 15 – Fotografía del láser YAG:Nd⁺⁺⁺ portátil.

En la Figura 16 se muestra el circuito completo para la alimentación y control de la lámpara flash de xenón, a través de la cual el cabezal láser emite radiación coherente de alta intensidad en el modo de *Q-switch* pasivo. El sistema láser además cuenta con la siguiente señalización:

- LED verde indicador de estado encendido del equipo.
- LED rojo indicador de batería baja. Para esto fue necesario añadir un pequeño circuito en el regulador antes del inversor. Éste se enciende cuando el voltaje de las baterías es inferior a 15.3 V.
- LED lila indicador cuando los capacitores de potencia están en carga, es decir cuando el *triac* permite la alimentación al triplicador.
- LED verde turquesa indicador de la señal del disparo. En cuanto dispara el láser, este LED se enciende.

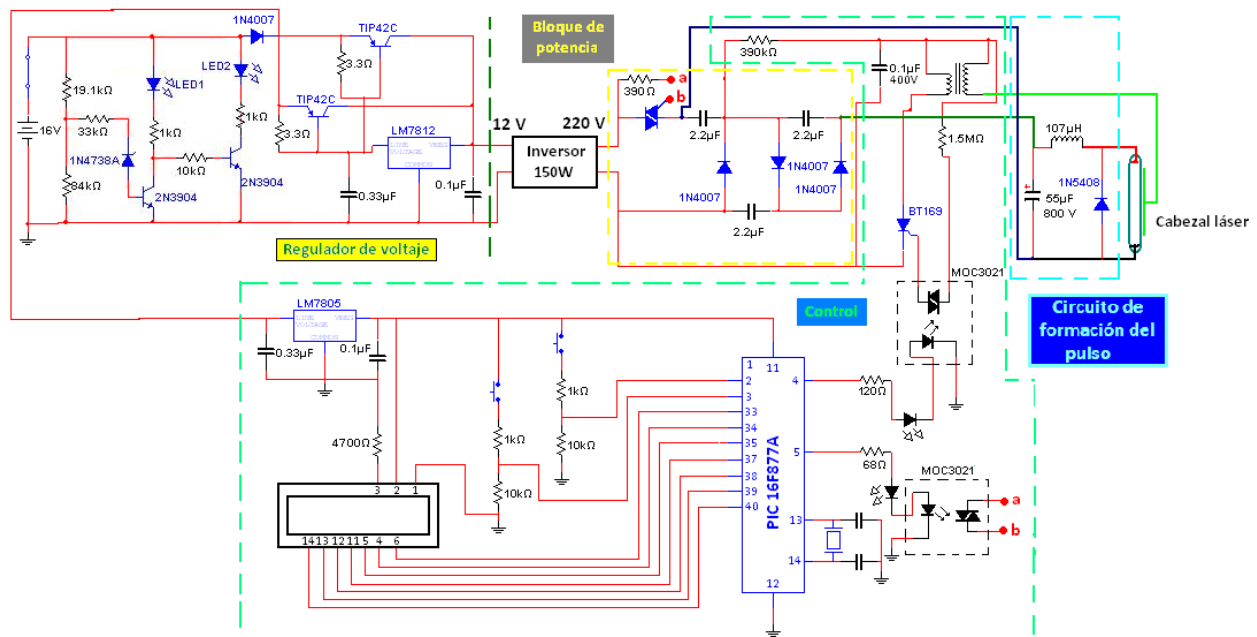


Figura 16 – Circuito electrónico del sistema láser portátil del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺.

4. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un sistema láser portátil del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺, cuya emisión se encuentra en el infrarrojo cercano ($\lambda = 1064 \text{ nm}$). El peso del láser es de aproximadamente 3 Kg, con dimensiones de 20x24x10 cm. Este equipo es el primero en su tipo, construido y desarrollado completamente en Bolivia. Todos los elementos electrónicos son comerciales y adquiridos en tiendas locales del rubro. El siguiente paso es su aplicación en tecnología LIBS, los

parámetros energéticos de emisión permiten concluir que es posible esta aplicación, habiéndose observado la generación de plasma en cada pulso de disparo de radiación concentrada.

5. REFERENCIAS

- [1] T. H. Maiman. *Phys. Rev. Letters*, vol. 4, 1960, pp. 564.
- [2] Maiman T. H., *Phys. Rev.*, vol. 123, 1961, pp. 1145.
- [3] Snitser E., *Phys. Rev. Letters*, vol. 7, 1961, pp. 444.
- [4] L. V. Tarasov. *Física de los procesos en los generadores de emisión óptica coherente*, MIR, 1981, en ruso.
- [5] F. Kaczmarek. *Introducción a la física de láseres*, MIR, 1981, en ruso.
- [6] D. A. Cremers and L. J. Radziemski. *Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*, John Wiley & Sons Ltd, England, 2006.
- [7] A. Miziolek et al. *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)*, Cambridge University Press. 2006.
- [8] Los Alamos National Laboratory. "LIBS Planetary Science Applications. Remote LIBS Mars Instrument Development Projects." Octubre de 2007. Internet: <http://libs.lanl.gov/Projects-MIDP-Main.html> .
- [9] O. Ormachea. "Diseño y construcción de un prototipo funcional de generación óptica cuántica (laser)." *Investigacion & Desarrollo*, vol. 7, 2007, pp. 71 - 82.
- [10] Ormachea O., *Diseño y construcción de un láser solido pulsado del tipo YAG:Nd⁺⁺⁺*, Revista Boliviana de Física, vol. 13, 2007, pp. 54 - 57.
- [11] A. Einstein. *Zs. Phys.* Vol. 18, 1917, pp. 21.
- [12] W. Chang. *Principles of Quantum Electronics; Lasers: Theory and Applications*, Massachusetts: Addison - Wesley, 1963.
- [13] O. Svelto. *Principles of Lasers*, Milan – Italia, Springer, 1998.
- [14] V. V. Antsiferov and G.I. Smirnov. *Physics of Solid-State Lasers*, Cambridge International Science Publishing Ltd., 2000.
- [15] Red Optronics BBo, LBO and KTP crystals. *LIF Crystal or Lithium Fluoride Quality optical crystals*. Internet: <http://www.redoptronics.com/lif-crystals.html>.
- [16] The Heraeus Noblelight Technical, *The Lamp Book*, Cambridge - United Kingdom: Cambridge Science Park, 2006.
- [17] J. E. Geusic et al. *Laser oscillations in Nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnets*, Appl. Phys. Lett., vol. 4, 1964, pp. 182 - 184.
- [18] D. W. Hart. *Electrónica de Potencia*, Madrid, Pearson Educación S.A., 2001, 84-205-31790.