

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA FUENTE DE ALTA TENSIÓN PARA LA EXCITACIÓN TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL DE LÁSERES GASEOSOS

Omar Ormachea Muñoz y Wendy Morrison Vila

Centro de Investigaciones Ópticas - CIO

Universidad Privada Boliviana

oormachea@upb.edu

(Recibido el 15 de octubre 2010, aceptado para publicación el 17 de noviembre 2010)

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó el diseño y construcción de una fuente de alta tensión para la excitación de emisión coherente de alta intensidad en el diapason UV en medios gaseosos. El transformador principal fue diseñado con los siguientes parámetros $P=660W$, voltaje en el primario $U=220 V$ y en el secundario $U=2200 V$, se utiliza un quintuplicador de tensión que consta de 5 condensadores de capacitancias: $C_1=0.05\mu F\pm 10\%$ - 3kV, $C_2=0.5\mu F\pm 10\%$ - 4kV, $C_3=0.5\mu F\pm 10\%$ - 4kV, $C_4=0.25\mu F\pm 10\%$ -4kV y $C_5=1\mu F\pm 10\%$ -4kV. La fuente provee un voltaje máximo de 15kV. Además, se construyó un autotransformador que permite la regulación de voltaje a la entrada de la fuente de alta tensión. Inicialmente, esta fuente será utilizada para la generación de radiación láser en N_2 en dos configuraciones: Transversal (TEA) y Longitudinal (TE) a una longitud de onda de 337,1 nm.

Palabras Clave: Opto-Electrónica, Fuente de Alta Tensión, Láseres.

1. INTRODUCCION

Los sistemas láseres sólidos actuales y la generación coherente de alta intensidad en el rango UV, han mejorado significativamente en los últimos años, y la importancia de radiación UV profunda está en aumento debido a que la longitud de onda de láseres gaseosos puede ser más corta que los generados por láseres de estado sólido por conversión a partir de sus armónicos. El rango de longitudes de onda es mucho más amplio para láseres gaseosos, y pueden generar longitudes menores a 200 nm (ArF: 193 nm, F₂: 157 nm, Ar₂: 126 nm, H₂: 110 nm, entre otros) [1].

La excitación usual de este tipo de láseres es a través de descargas eléctricas con alta energía del haz de electrones, donde la descarga puede ser transversal [2, 3] o longitudinal a la dirección de emisión estimulada [4, 5]. En el caso particular de un láser gaseoso de N_2 , se tiene los láseres de presión atmosférica y los de presiones bajas. La primera clasificación es la llamada TEA (de sus siglas en inglés *Transversely Excited Atmospheric pressure discharge*, descarga Transversal Eléctrica a presión Atmosférica). Este tipo de láser no necesita de ningún sistema de vacío y puede operar con el aire como medio activo. Esta última propiedad hace de él un láser bastante atractivo para su construcción por su bajo costo y su aparente facilidad de montaje. Lamentablemente, su puesta en marcha no es tan fácil como parece, ya que otros aspectos de los láseres TEA son bastante exigentes: la reducción de la inductancia, la alineación de los electrodos y la rapidez de los pulsos; por otro lado, el oxígeno presente en el aire interrumpe el camino óptico haciendo del láser N_2 TEA, un láser bastante susceptible a cualquier cambio en sus parámetros [6].

El láser N_2 TEA emite a menor potencia y a mayor anchura temporal que el láser N_2 a bajas presiones [7], por otra parte, la versión del láser N_2 a presiones bajas no requiere un alto vacío, es de relativamente fácil montaje, produce picos entre 5 y 9 ps, y se puede obtener potencias de cientos de kW sin muchos requerimientos tecnológicos [6].

2. MOTIVACION Y OBJETIVOS

El Centro de Investigaciones Ópticas de la Universidad Privada Boliviana dentro de sus líneas de investigación, tiene como prioridad el desarrollo de tecnología láser para diferentes aplicaciones. En la actualidad, es prácticamente imposible imaginar un campo de investigación y desarrollo sin el uso de la óptica del láser, ya que es utilizado ampliamente en el desarrollo tecnológico actual y va acompañado de repercusiones económicas, sociales e incluso políticas.

Por otra parte, este tipo de tecnología de punta, adaptada en Bolivia, tiene una importancia estratégica para la región, ya que el acceso a dichos elementos tecnológicos es muy limitado debido a la falta de recursos tanto humanos como de capital.

Las consideraciones anteriores han motivado la realización de la presente investigación, cuyo objetivo es el de diseñar y construir una fuente de alta tensión para la alimentación de un sistema de descarga transversal del tipo Blumlein, para la generación de radiación coherente de alta intensidad de una longitud de onda de 337,1 nm, que usa como medio activo el nitrógeno del aire.

3. MARCO TEORICO

En este párrafo, se presenta una breve descripción del principio de funcionamiento de los sistemas de láseres gaseosos (como el N_2) y los circuitos de descarga ultrarrápidos de alta tensión.

▪ Principio de funcionamiento de un láser gaseoso de N_2

Los láseres de nitrógeno molecular pueden operar tanto en el ultravioleta como en el infrarrojo y debido a las características de la estructura cuántica de la molécula el sistema es intrínsecamente pulsado. La emisión ultravioleta (337,1 nm) es super-radiante, es decir, puede emitir coherentemente sin necesidad de una cavidad óptica debido a su alta ganancia 50dB/m [8].

Para que se pueda producir emisión láser en el gas, es necesario llevar a la mayoría de los átomos o moléculas que conforman el gas, y que inicialmente se encuentran distribuidos en los niveles de energía inferiores, al mismo nivel de energía (niveles superiores). La excitación inicial de las moléculas (bombeo) se lleva a cabo por impacto electrónico.

▪ Niveles energéticos y transiciones láser

Los láseres de gas frecuentemente se subdividen según el medio activo en tres tipos [9], [10], [11]: atómicos, iónicos y moleculares. Los sistemas moleculares, a diferencia de los atómicos, además de tener niveles energéticos electrónicos, poseen subniveles vibracionales y rotacionales. La transición óptica se puede llevar a cabo entre distintos niveles electrónicos, distintos niveles vibracionales, o en diversas combinaciones de ellos.

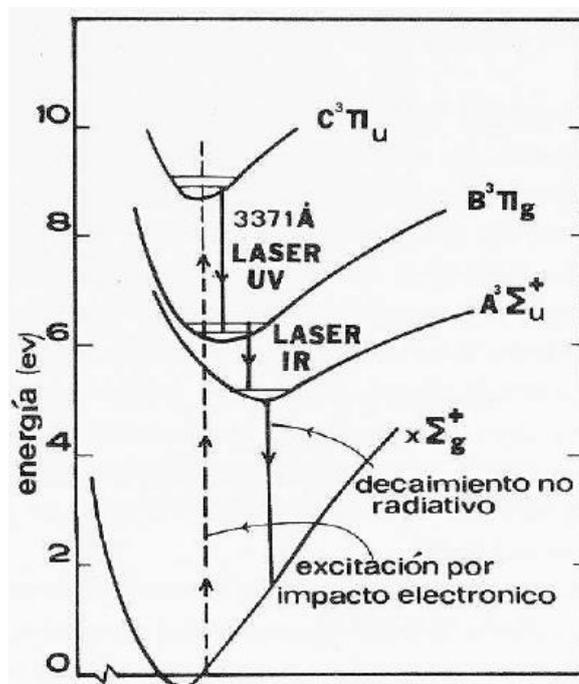


Figura 1 – Niveles energéticos relevantes en la transición láser de la molécula de nitrógeno.

El nitrógeno atómico tiene siete electrones, dando lugar a una estructura espectroscópica de doblete; en el nitrógeno molecular sin embargo, el número de electrones se duplica y el sistema da lugar a una estructura de singuletes y tripletes. El primer sistema positivo de bandas de emisión es aquel en el que los momentos orbitales totales de cada átomo de la molécula son cero (4S). La banda de singuletes tiene emisiones al estado base en el infrarrojo (IR), en el visible y en el UV, que dan lugar a la emisión fluorescente que se observa en el tubo de un láser de este tipo [12]. El

tripleto de menor energía ($A^3\Sigma_u^-$), es meta estable, pues solo puede decaer al singulete base $X^1\Sigma_g^+$, siendo ésta una transición prohibida en la región de 250 a 400 nm ($A^3\Sigma_u^- - X^1\Sigma_g^+$).

En el primer sistema positivo de tripletes está el nivel $B^3\Pi_g$ que decae al $A^3\Sigma_u^-$ generando una banda de 700 a 1500 nm, en éste se ha observado radiación laser en el cercano IR. En el segundo sistema positivo, el momento orbital total de uno de los átomos pasa de 4S a 2D , en esta rama se encuentra el nivel $C^3\Pi_u$ y éste decae al nivel $B^3\Pi_g$ en una transición de dipolo permitida ($J=1$ a $J=0$) en el UV entre 295 y 337,1 nm, Figura 1. En esta transición super-radiante se puede obtener radiación laser.

Los tiempos de vida medio τ de los distintos niveles en la banda de tripletes son [12]:

$$\tau(C^3\Pi_u) = 4.7 \times 10^{-8} s, \quad \tau(B^3\Pi_g) = 8.0 \times 10^{-6} s, \quad \tau(A^3\Sigma_u^-) = 2.0 s$$

Debido a que el nivel $C^3\Pi_u$ tiene menor duración que el nivel $B^3\Pi_g$, la transición laser entre estos niveles se auto-determina, ya que después de un tiempo del orden de $4.7 \times 10^{-8} s$, no puede haber inversión de la población entre los dos primeros niveles. El resultado es entonces un láser inherentemente pulsado.

Los láseres de nitrógeno molecular pueden ser excitados por impacto electrónico longitudinal o transversal en la dirección en que se emite la radiación. La potencia que se puede obtener del sistema, en este último caso, es mucho mayor. La avalancha electrónica de excitación debe ser lo suficientemente rápida para poblar el nivel superior de la transición laser $C^3\Pi_u$ antes de que éste decaiga al nivel inferior de la transición laser $B^3\Pi_g$ por emisión espontánea y no permita la inversión de la población. Esto implica que el tiempo de subida del pulso electrónico de excitación debe llevarse a cabo en un lapso menor a $4.7 \times 10^{-8} s$. Por estas características, se debe diseñar un circuito electrónico que funcione en condiciones de excitación electrónica muy rápida.

▪ Sistema ultra-rápido de descarga

Un criterio fundamental para el diseño de un láser de N_2 es la capacidad de excitar tantas moléculas de nitrógeno como sea posible y realizar esta operación en menos de 47 nanosegundos, debido a la duración de la inversión de la población mencionada anteriormente, para ello, se utiliza una descarga de alta densidad de corriente. El esquema escogido en este trabajo, de los diferentes tipos de esquemas de descargas ultra-rápidas, es el de Blumlein.

El circuito de descarga Blumlein debe su nombre al ingeniero eléctrico británico Alan Dower Blumlein, Figura 2, que inventó sistemas de grabación de discos estéreos y desarrolló procedimientos especiales para la fabricación de tubos de televisión y radares [13]

El circuito Blumlein utiliza dos capacitores dispuestos en paralelo. Las dos placas negativas están cercanas entre sí (≈ 1 cm). Conforme aumenta el voltaje de carga, ambos capacitores se cargan al mismo potencial y a la misma polaridad. El momento en el que se alcanza el voltaje de ruptura en la llave rápida (*spark-gap*), ésta se cierra poniendo al capacitor C1 en cortocircuito y haciendo, de esta manera, que su carga fluya hacia tierra; al mismo tiempo, la bobina deja de conducir debido al brusco cambio de corriente, impidiendo que el capacitor C2 también se descargue a tierra. De esta forma, se crea una diferencia de potencial que a su vez produce una descarga entre las placas, la cual viaja de adentro hacia afuera en unos cuantos nanosegundos.

La alta densidad de corriente es necesaria para que la mayor cantidad posible de moléculas sean llevadas al nivel de inversión de la población, y se consigue almacenando la energía eléctrica en condensadores de alto voltaje y baja inductancia. La energía almacenada en los condensadores está dada por la siguiente relación [14].

$$E = \frac{CU^2}{2} \tag{1}$$

La tensión típica en láseres de nitrógeno comerciales es de unos 20 kV y la capacitancia de 12 nF, con estos valores y usando la relación 1 se tiene una energía del orden de los 2.4 J. La baja capacitancia garantiza una descarga ultra-rápida entre los electrodos del láser de N_2 .

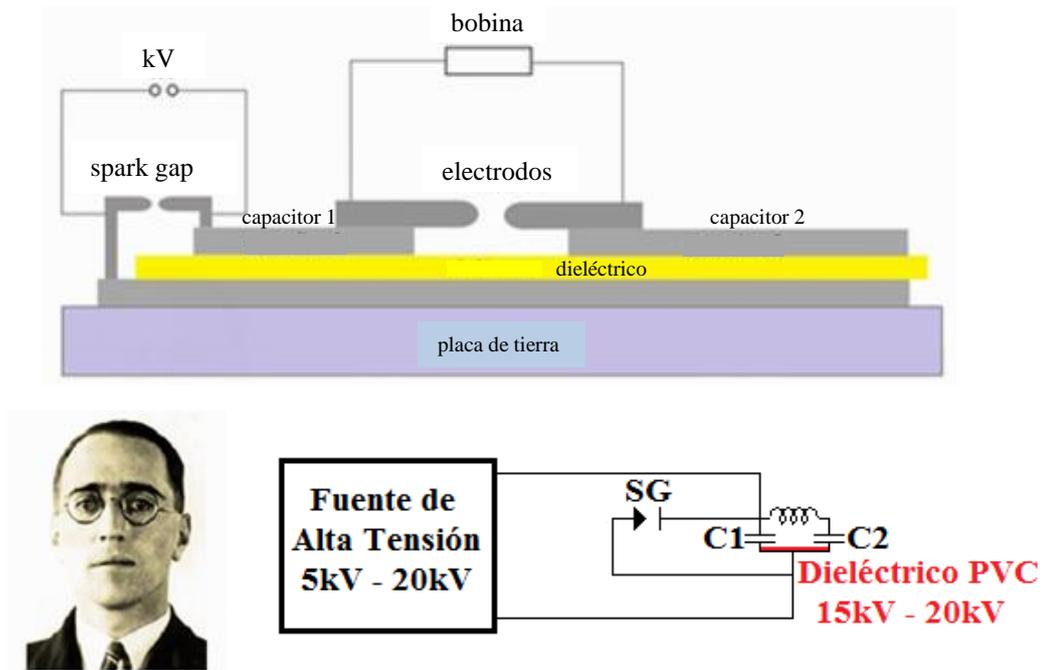


Figura 2 – Esquema de funcionamiento de un láser de N_2 (a), Circuito eléctrico de descarga Blumlein.

Para voltajes típicos mencionados (≈ 20 kV) y circuitos de baja inductancia, se puede lograr corrientes pico de aproximadamente 2 kA. Este último valor se obtiene del tiempo de descarga $\delta\tau \approx 100$ ns y la capacitancia mencionada 12 nF, pues del producto CV se obtiene la carga almacenada $Q=CV$ y el cociente en tiempo la corriente $i = \delta Q / \delta\tau \approx 2$ kA que, efectivamente, es una alta densidad de corriente a pesar de que la energía almacenada en el capacitor no tiene valores altos.

4. DESARROLLO DE LA FUENTE DE ALTA TENSION

En la Figura 3 se muestra el circuito electrónico de la fuente de alta tensión desarrollada y el circuito de descarga ultra-rápida de Blumlein. El esquema muestra la forma de la disposición de los diferentes componentes del sistema que se explicará en detalle a continuación, tanto su diseño, desarrollo como su construcción, además de los cálculos de potencia y pérdidas del sistema.

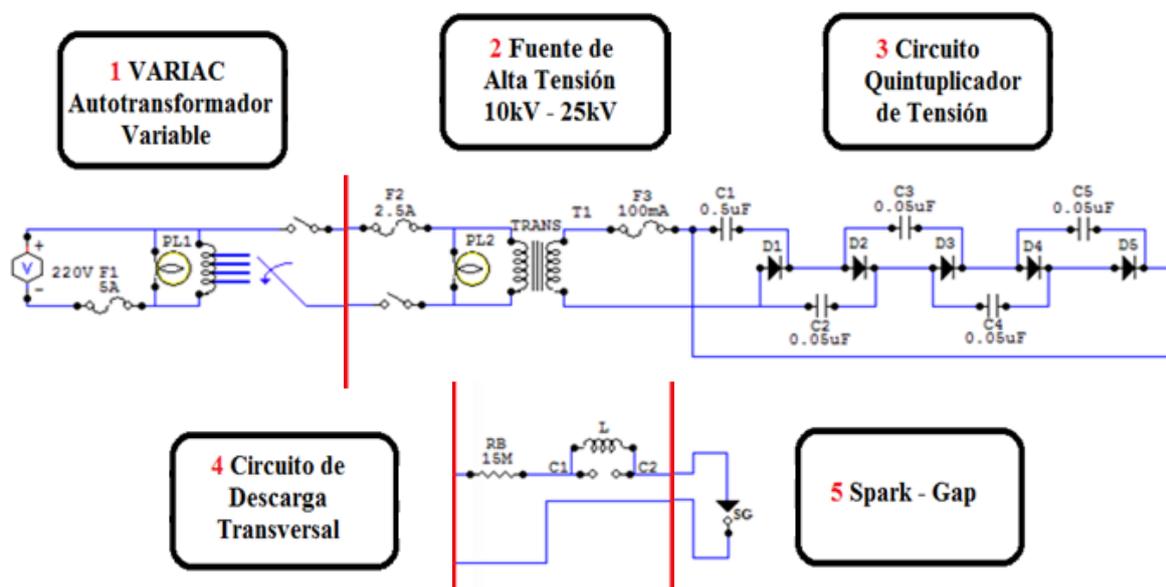


Figura 3 – Esquema de desarrollo de la fuente de alta tensión y el sistema de descarga ultra-rápida de Blumlein.

▪ Fuente de alta tensión y cálculo del transformador de potencia

Para el diseño de la fuente de alta tensión, se tomaron en cuenta factores como ser: potencia del transformador, tensión de salida y pérdidas de potencia en la fuente propiamente dicha. Se partió del núcleo de un transformador para ajustar a éste las necesidades requeridas por la fuente. Teniendo como dato el largo y ancho de las chapas de metal, se calculó el área S de la sección transversal del núcleo, $S = L \times A = 4\text{cm} \times 6.55\text{cm} = 26.2\text{ cm}^2$, Figura 4.

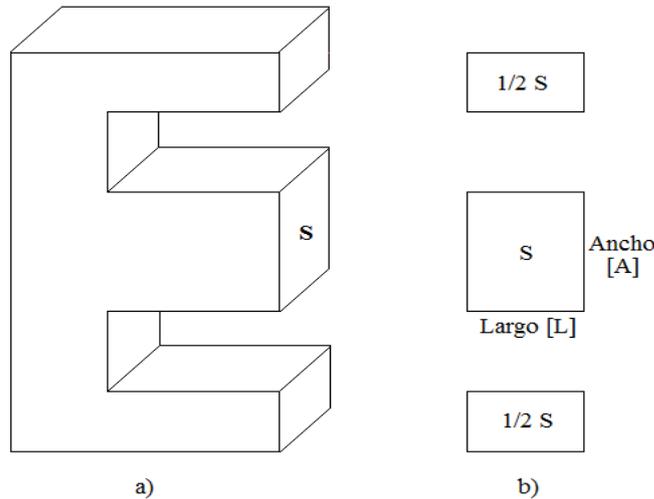


Figura 4 – Núcleo del transformador, vista lateral de las chapas (a), vista frontal de las chapas (b).

Se puede determinar entonces los siguientes parámetros:

$$N = \frac{10^8 \times V}{4.44 \times f \times B \times S} \quad (2)$$

N = número de espiras en primario
 V = voltaje en el primario
 B = constante de flujo del núcleo (10000)
 f = frecuencia

$$N = \frac{10^8 \times V}{4.44 \times 50 \times 10000 \times 26.2} = 1.72 \left[\frac{\text{espiras}}{V} \right]$$

De donde se deduce la constante de curva K ,

$$K = \frac{1}{N} = \frac{1}{1.72} \rightarrow K = 0.58$$

Esta constante de curva fue obtenida de manera empírica, a partir de los valores de transformadores con parámetros conocidos del valor de K en función de la potencia de los transformadores.

De la gráfica de la Figura 5, para $K = 0.58$ se obtiene una potencia $W = 750$ [W]. Para poder calcular el número de espiras en el primario, se consideró que el voltaje con el que se trabajaría en este embobinado sería 220V.

TABLA 1 – PARAMETROS DE CABLES DE COBRE AWG

Número AWG	Diámetro (mm)	Sección (mm ²)	Km 25 °C	Kg/m	C esmalte (mm)	Cap. Cond. Aprox.
500	20.60	253.00	-	-	-	515
400	18.44	203.00	-	-	-	455
300	17.27	152.00	-	-	-	375
250	15.77	126.70	-	-	-	340
0.000	11.7	107.00	0.174	953.0	-	300
0.00	10.4	85.00	0.207	756.0	-	213
0.0	9.3	67.4	0.261	599.0	-	175
0	8.3	53.5	0.329	475.0	-	130
1	7.3	42.4	0.415	377.0	-	110
2	6.5	33.6	0.523	299.0	-	90
3	5.8	26.7	0.629	237.0	-	75
4	5.2	21.2	0.831	188.0	-	70
5	4.6	16.8	1.05	149.0	-	55
6	4.1	13.3	1.32	118.0	-	50
7	3.7	10.5	1.67	93.7	-	45
8	3.3	8.37	2.10	74.4	3.41	33
9	2.91	6.63	2.65	58.9	3.02	28
10	2.59	5.23	3.34	46.8	2.69	25
11	2.30	4.11	4.21	37.1	2.41	20
12	2.05	3.31	5.31	29.4	2.13	18
13	1.83	2.62	6.70	23.3	1.92	16
14	1.63	2.08	8.45	18.5	1.73	13
15	1.45	1.65	10.7	14.6	1.54	10
16	1.29	1.31	13.4	11.6	1.38	8
17	1.15	1.04	16.9	9.23	1.24	4
18	1.02	0.823	21.4	7.32	1.10	3
19	0.91	0.653	26.9	5.80	0.98	2
20	0.81	0.518	34.0	4.60	0.88	1.8
21	0.72	0.411	42.8	3.65	0.80	1.5
22	0.64	0.326	54.0	2.89	0.70	1.2
23	0.57	0.258	68.1	2.30	0.63	1.0
24	0.51	0.205	85.9	1.82	0.57	0.8
25	0.456	0.162	108.0	1.44	0.51	0.6
26	0.405	0.129	137.0	1.14	0.45	0.55
27	0.361	0.102	172.0	0.908	0.41	0.45
28	0.321	0.0801	217.0	0.720	0.37	0.40
29	0.286	0.0642	274.0	0.571	0.34	0.30

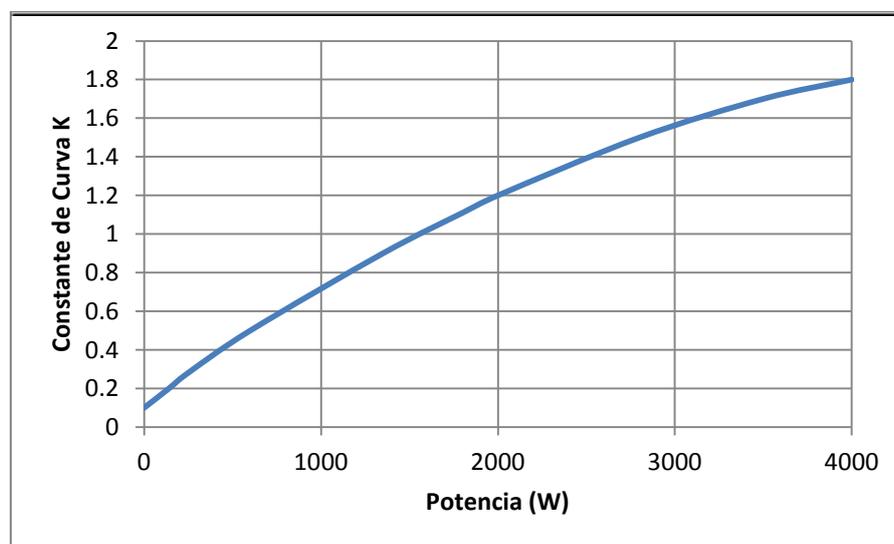


Figura 5 – Curva para cálculo de potencia de transformadores.

Entonces, para un voltaje de $V_p = 220V$ en el primario, se tiene:

$$\# \text{ Esp. primario} = 1.72 \left(\frac{\text{espiras}}{V} \right) \times 220(V) = 378.4 \text{ espiras} \cong 379 \text{ espiras}$$

$$I_p = \frac{750 (W)}{220 (V)} = 3.4(A)$$

donde I_p es la corriente en el primario.

Con el dato de la corriente que fluye a través del primario, se utiliza la Tabla 1 para determinar el número de alambre a utilizarse en dicho devanado. Se puede ver que el alambre que se adecúa a las exigencias del primario es el #18 ($\varnothing=1.02$ mm, sección = 0.823 mm²; $I = 3$ A).

Tras medir las secciones de la placa de metal a utilizarse como núcleo, se determinó que para 1 espira es necesario 0.25 (m) de alambre, por lo tanto para, 374 espiras se requieren 94.5 (m) de alambre. Por otra parte, de la Tabla 1 se tiene que 1 (km) de alambre pesa 7.32 (kg), por lo que los 94.5 (m) pesan 0.690 (kg).

Posteriormente, se realizó el cálculo para el embobinado del devanado secundario, haciendo nuevamente uso de la Tabla 1. Para la corriente en el secundario, se tiene de la Figura 4 una potencia $W = 750$ (W), entonces para un voltaje en el secundario de $V_s = 2100$ (V) se tiene una corriente I_s en el secundario de:

$$I_s = \frac{750 (W)}{2100 (V)} = 0.36 (A)$$

Para el número de espiras en el secundario:

$$\# \text{ Esp. secundario} = 1.72 \left(\frac{\text{espiras}}{V} \right) \times 2100(V) = 3612 \text{ espiras}$$

Con el dato de la corriente que se induce en el secundario, se determina a partir de la Tabla 1 el número de alambre a utilizarse en dicho devanado. Se observa que el alambre que se adecúa a las exigencias del secundario es el #29 ($\varnothing = 0.286$ mm; sección = 0.0642 mm²; $I = 0.34$ A).

Tras medir el perímetro de las placas de metal a utilizarse como núcleo, incluyendo las camadas del primario, se tiene que para 1 espira es necesario 0.29 (m), por lo tanto para 3612 espiras se requieren 1047.5 (m) de alambre. Por otra parte, de la Tabla 1 se tiene que 1 (km) de alambre pesa 0.571 (kg), por lo que los 1047.5 (m) pesan 0.598 (kg).

▪ Construcción del transformador y del circuito quintuplicador

El primer paso en la construcción del transformador es construir la forma donde se embobinarán los devanados. La forma utilizada se muestra en la Figura 6a.

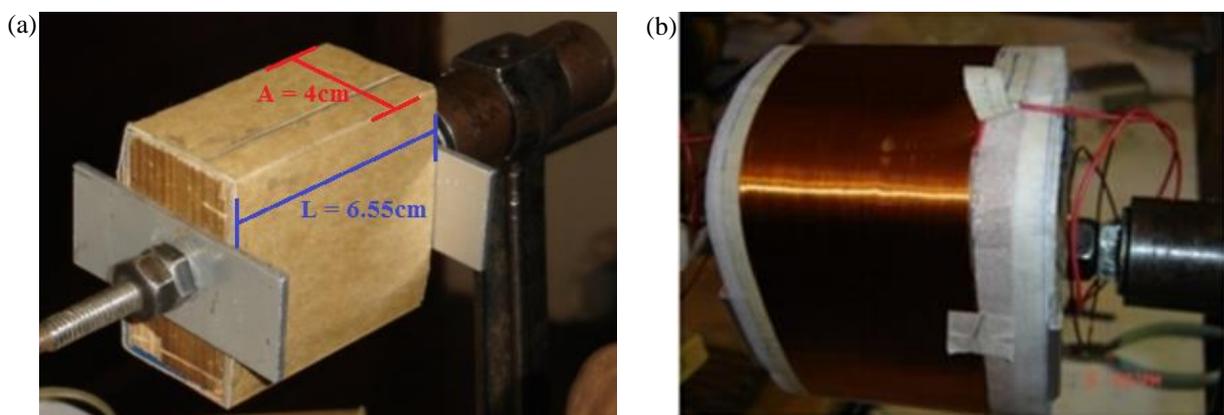


Figura 6 – Forma utilizada para la construcción del transformador (a), embobinado primario y secundario terminado (b).

El largo de la forma debe cubrir el largo de las ventanillas de las chapas de metal. Con la forma construida, se enrolla el devanado primario, procurando que el mismo quede muy parejo, sin separación alguna y sin que se monte una espira sobre otra en la misma camada. Esta operación se realiza en un torno con cuenta vueltas y haciendo girar el mismo de forma manual y a velocidad moderada.

Se procede posteriormente a enrollar el secundario, tomando en cuenta las recomendaciones descritas anteriormente, este paso se muestra en la Figura 6b.

Como se requieren altas tensiones para lograr las descargas transversales y longitudinales, se procedió a la elaboración de un circuito quintuplicador para ayudar a elevar la tensión de salida. Dicho circuito será conectado a la salida del transformador y alimentará directamente al láser gaseoso. Para esto, se diseñó el circuito electrónico que se muestra a continuación en la Figura 7a.

Se observa que el circuito consta de una sucesión de 5 componentes, cada una formada por diodos y un condensador de alta tensión. Los componentes utilizados en la realización de este circuito son: $C_1 = 0.5\mu\text{F}$, 3kV; $C_2 = 0.05\mu\text{F} \pm 10\%$, 4kV; $C_3 = 0.05\mu\text{F} \pm 10\%$, 4kV; $C_4 = 0.05\mu\text{F} \pm 10\%$, 4kV y $C_5 = 0.05\mu\text{F} \pm 10\%$ 3kV; $D_1 = D_2 = D_3 = D_4 = D_5 = 1\text{N}4007$; 1000V, 1A cada uno.

Los diodos mostrados en la Figura 7a, están compuestos a su vez por 5 diodos con las características mencionadas anteriormente. En cada etapa se soldó una resistencia de $10\text{M}\Omega$ a 4 de cada 5 diodos utilizados por línea. El uso de cada una de estas resistencias en las etapas del circuito permite:

- Mantener fija la tensión que atraviesa cada diodo.
- En caso de que el último diodo de cada etapa (el que no lleva resistencia) dejara de funcionar, el arreglo de resistencias previo impide que se dañen los otros 4 elementos de cada etapa.

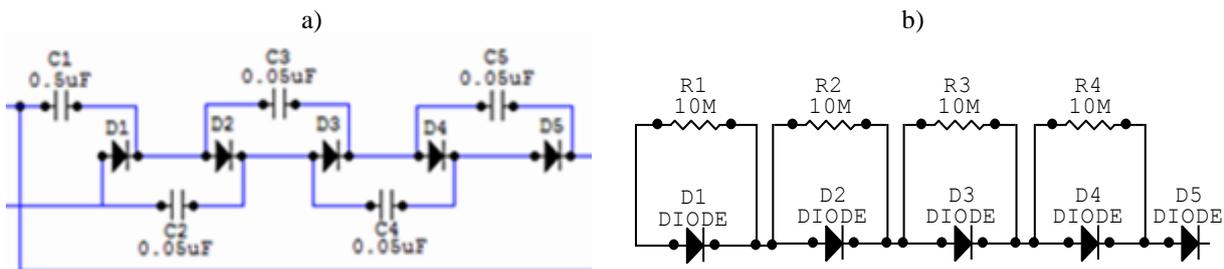


Figura 7 – Circuito electrónico del sistema quintuplicador de voltaje (a), y arreglo de diodos y resistencias, elementos componentes del quintuplicador.

En la Figura 8 se muestra la fuente de alta tensión y el sistema multiplicador de voltaje construido.

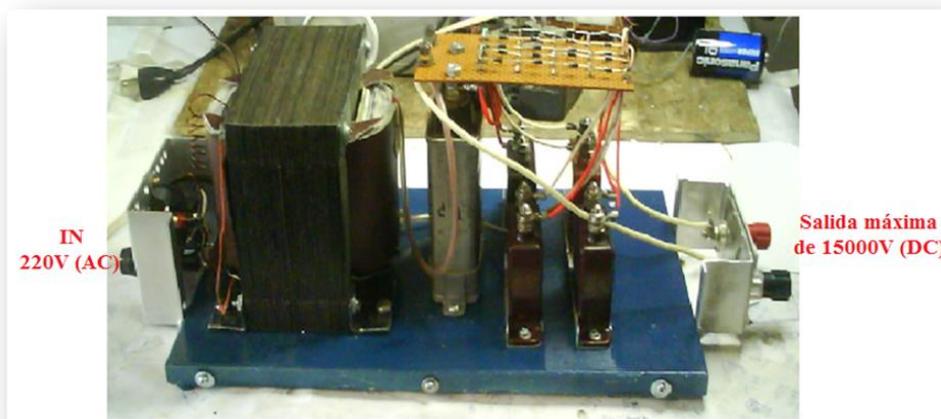


Figura 8 – Fuente de alta tensión construida.

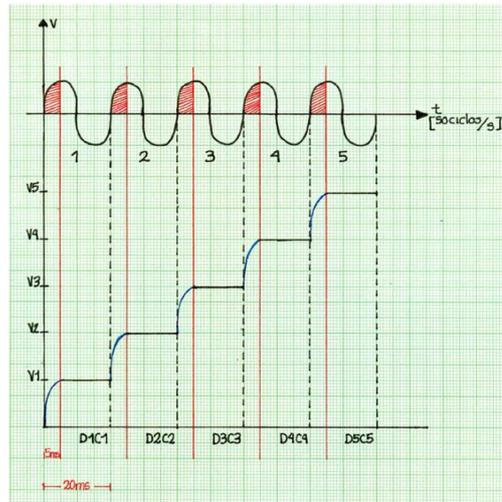


Figura 9 – Esquema de funcionamiento del sistema quintuplicador.

El funcionamiento del sistema multiplicador se ilustra en la Figura 9, donde se tiene el comportamiento esquemático de doblaje de voltaje en cada una de las etapas. Se tiene que, en el primer ciclo, el primer condensador se carga al voltaje de salida del transformador de potencia (aproximadamente 2200 V); en la segunda etapa, este voltaje se duplica ya que el voltaje almacenado en el condensador más el voltaje de entrada da como resultado un aumento en la tensión de aproximadamente 4400 V y, de esa manera, el quintuplicador entrega en la parte final alrededor de 11 kV. Este valor se debe aún multiplicar por un factor de $\sqrt{2}$ debido a la conversión de AC a DC, dando un valor efectivo de voltaje rectificado de aproximadamente 15,4 kV.

▪ **Autotransformador variable**

Un autotransformador es un elemento eléctrico, de construcción y características similares a las de un transformador, pero a diferencia de éste, posee un único devanado alrededor del núcleo [15]. El uso de este elemento permite graduar la tensión de entrada a la fuente para un mejor control sobre la misma.

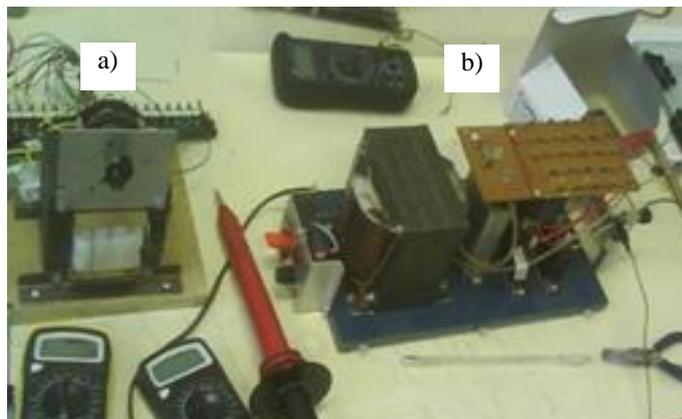


Figura 10 – Autotransformador (a), fuente de alta tensión (b).

El autotransformador construido consta de 24 derivaciones que regulan la tensión de entrada entre 5V y 220V. Como en el caso del transformador principal de alta tensión, se parte del núcleo de un transformador para ajustar a éste las necesidades requeridas por la fuente. El control de las derivaciones es gobernado por un *rotary-switch* mecánico que posee 15 posiciones, permitiendo una variación en el voltaje de entrada del sistema principal de potencia.

En la Figura 10 se muestra el sistema electrónico de potencia montado. En la parte izquierda, a), se puede apreciar el autotransformador construido y el sistema de control de potencia de entrada hacia el transformador principal de alta tensión, el mismo que se encuentra en la parte derecha de la Figura, b).

5. CIRCUITO DE DESCARGA TRANSVERSAL Y EL SPARK-GAP

En esta parte del trabajo de investigación, se diseñó un prototipo preliminar de descarga ultra-rápida, basada en el circuito Blumlein anteriormente descrito. Se construyeron una gran cantidad de electrodos de diferentes longitudes y materiales, los mismos que fueron usados para la descarga ultra-rápida. La parte crítica en esta parte del diseño y construcción es que el maquinado de estos elementos debe tener una precisión del orden de 0,1 mm [8], teniendo mucha importancia además el posicionamiento de los mismos, paralelos, tarea no muy fácil de ejecutar.

El circuito Blumlein fue realizado en base a láminas de papel aluminio y vidrio de 5 mm de espesor (ver Figura 2). Entre las placas conductoras se introdujo 3 capas de un material plástico no conductor, como dieléctrico en los capacitores de potencia.

En la experiencia preliminar, el *spark-gap* tuvo una apertura longitudinal de 10 -14 mm permitiendo trabajar con voltajes de hasta 15 kV. Se obtuvo el efecto corona, muy marcado en el espectro visible cercano al UV, entre los electrodos del esquema Blumlein, lo cual certifica la ionización de las moléculas de hidrogeno del aire. No se contó con un espectrómetro para el estudio de la emisión coherente, siendo ésta una etapa posterior al presente trabajo.

6. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un prototipo funcional de un diseño de una fuente de alta tensión que permite voltajes de alimentación que varían entre 5 kV a 15 kV. El aporte de este trabajo es la fabricación del sistema mencionado con el uso de elementos comerciales fácilmente accesibles. Se utilizaron resistencias de protección en los diodos del circuito quintuplicador, este diseño permite y previene daños en los mismos y en los condensadores. Por otra parte, la implementación de una resistencia de balastro a la salida de la fuente permite limitar el paso de corriente desde la fuente hasta el sistema de excitación del gas, protegiendo la fuente de alta tensión.

Se realizaron pruebas preliminares para la obtención de radiación laser UV, se observó claramente el efecto corona entre los electrodos de alta tensión en el circuito Blumlein, lo cual demuestra la ionización de las moléculas de H₂ a presión atmosférica.

El siguiente paso es la obtención de radiación coherente de alta intensidad en el diapason UV y el estudio de sus características energéticas y temporales.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la cooperación del Ing. Carlos Ormachea, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo, sus valiosas sugerencias que fueron importantes para el diseño y construcción del prototipo, y su tiempo en cada una de las etapas de fabricación, medición y pruebas experimentales.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] M. A. El-Osealy et al. "Oscillation and gain characteristics of high power co-axially excited N₂ gas lasers." *Optics Communications*, vol. 194, pp. 191 – 199, 2001.
- [2] R.W. Waynant and A.W. Ali. "Experimental Observations and Calculated Band Strengths for the D₂ Lyman Band Laser." *Journal of Applied Physics*, vol. 42, 1971, pp. 3406 - 3408.
- [3] M. Corti. "Pulsed neon laser at 5401Å with subnanosecond emission." *Optics Communications*, vol. 4, pp. 373 – 376, 1972.
- [4] H. Furuhashi and T. Goto. "Longitudinal discharge N₂ laser with automatic preionization using LC inversion circuit." *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 59, 1988, pp. 2552 – 2556, 1988.
- [5] A. S. Provorov et al. "Pulsed Gas Lasers with Longitudinal Discharge and Their Application in Medicine." *Laser Physics*, vol. 15, no. 9, pp. 1299 – 1302, 2005.
- [6] G. Lespinasse et al. "Electrical investigation of the transverse discharge of UV nitrogen gas laser." *Revue Phys. Appl*, vol. 22, pp. 767 – 773, 1987.
- [7] D. Q. Trung et al. *High-efficiency compact TEA nitrogen laser*, SPIE, 2538, pp. 230 – 235, 1995.
- [8] M. Villagrán. "Laseres de N₂ para fines didácticos." *Revista Mexicana de Física*, vol. 40, pp. 935 – 945, 1994.
- [9] O. Zvelto. *Principles of lasers*, 4 ed., Springer, 1998.
- [10] L.V. Tarasov. *Física de los procesos en los generadores de emisión óptica coherente*, MIR, 1981, en ruso.
- [11] F. Kaczmarek. *Introducción a la física de láseres*, MIR, 1981, en ruso.

- [12] C.S. Willet. *Introduction to gas lasers*, Pergamon pres, NY, 1974.
- [13] http://www.iberdrola.es/webibd/gc/prod/es/doc/genios_electricos_1.pdf (Genios de la ingeniería eléctrica de la A a la Z)
- [14] http://www.heraeus-noblelight.com/en/laser-and-ipl-lamps/information-for-laser-lamps/services-and-events/the-lamp-book.html?no_cache=1&sword_list%5B%5D=book (The lamp book – technical reference book for arc and flash lamp).
- [15] <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Autotransformador&oldid=35033896> (Wikipedia, La enciclopedia libre).