



**DISEÑO DE UNA FUENTE DE ALTO VOLTAJE PARA LA GENERACION DE ARCOS
ELECTRICOS**

JOSÉ BAQUELI BLANQUICETT CARVAJAL



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2008**



**DISEÑO DE UNA FUENTE DE ALTO VOLTAJE PARA LA GENERACION DE ARCOS
ELECTRICOS**

JOSÉ BAQUELI BLANQUICETT CARVAJAL

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

Director

**JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA
Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2008**



Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 8 de Febrero del 2008



Dedicado

A Dios, por ser mi salvador, mi protector y mi guía

A mi Madre, Gladis Carvajal Ortiz, por su apoyo y sacrificio en cada momento de mi vida

A mi nona Herminia Ortiz, que desde arriba me acompaña e ilumina, te extraño

A mis hermanos Erika Raquel, José Vicente, Karina Estela, Carlos Andrés,

*Manuel José, Marian José y María Raquel, siempre están en mis oraciones, pensamientos,
y sobre todo en mi corazón*

A mi tía Edá Olarte, la quiero y siempre esta conmigo

A mis tíos Camilo y Néstor por su cariño y orientación

A mis Primos en especial Camilo Olarte y Maryuris Ortiz

A toda mi familia, que son la familia de mis hermanos

A mi novia Gloria Marcela Mejía Suarez, la cual amo y deseo en mi futuro

A Manuel José Rudas Rudas por su apoyo

A mis grandes amigos Luis Guillermo Trujillo y Alber Marmol

A todos mis profesores, es uno de muchos frutos



AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Juan Carlos Mantilla Saavedra, mi director de proyecto, compañero y amigo, por su comprensión, apoyo y colaboración.

A la profesora Claudia Paulina González Cuervo Física M. Sc. Ph. D. Por su gran aporte, orientación y colaboración en el proyecto.

A la profesora Claudia Sofía Quintero Duque Química. Esp. por su aporte y colaboración.

A mis compañeros de la universidad, Libardo Gómez, Rossana Castro, Diego Galviz, Kelly Plata y Diana por su amistad y apoyo,

A los profesores Jaime Dulce Moreno Lic. M. D. Física; Ely Dannier V. Niño M. Física, Valeri Dougar Jabon Ph. D. en Física (Física del plasma), Priot Zigankov Ph. D. Física; A todos ellos por su orientación en el tema y colaboración.

A María Ximena Martínez, Liliana Lucia Urbano del Departamento de Bienestar Universitario, de la U.P.B. sec. Bucaramanga, por su apoyo en el transcurso de mi estudio universitario.

A los profesores de Ingeniería Electrónica, la faculta de Ingeniería Electrónica y toda la Universidad Pontificia Bolivariana por toda la formación, orientación y capacitación integral y humana.



CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCION	1
1. GENERALIDADES	3
1.1. EL PLASMA.....	7
1.2. TIPOS DE DESCARGAS.....	13
2. FUENTE DE ALTO VOLTAJE PARA LA GENERACIÓN DE ARCOS ELÉCTRICOS	21
2.1 CONCEPTUALIZACIÓN.....	21
2.2. GENERALIDADES DE LA INGENIERIA CONCEPTUAL DEL PROCESO DE GENERACION DEL PLASMA MEDIANTE ARCOS ELECTRICOS PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS.....	23
2.3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS.....	28
2.3.1. Fuente Switching.....	34
2.3.2. Fuente Regulada de Voltaje Protek 3003B.....	38
2.3.3. Fuente Regulada de Voltaje Basada en el LM317.....	42
2.4. DISEÑO DE LA FUENTE DE ALTO VOLTAJE PARA LA GENERACIÓN DE ARCOS ELECTRICOS.....	48
2.4.1. Descripción Básica de Componentes.....	48
2.4.2. Rectificación.....	52
2.4.3. Filtrado.....	54
2.4.4. Pruebas del Diseño.....	56
2.5. PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN CON LA FUENTE GENERADORA DE ARCOS ELÉCTRICOS.....	60
2.5.1. Exposición del Cigarrillo al Arco Eléctrico.....	61
2.5.2. Exposición de Grano de Café al Arco Eléctrico.....	62



2.5.3. Exposición del Icopor al Arco Eléctrico.....	63
2.5.4. Exposición del Vaso Plástico al Arco Eléctrico.....	63
2.5.5. Exposición del Papel Plastificado al Arco Eléctrico.....	64
2.5.6 Pruebas Complementarias.....	65
CONCLUSIONES.....	68
REFERENCIAS.....	70



LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1. Estructura de los Estados de la Materia.....	8
Figura 1.2. Imagen del fenómeno del rayo	10
Figura 1.3. Características voltaje – corriente.....	13
Figura 1.4. Temperaturas del gas y de los electrones en una descarga DC para una mezcla de gas noble y mercurio a diferentes presiones de gas e igual corriente.....	17
Figura 1.5. Configuraciones para la generación de DBD. a) doble barrera, b) barrera sencilla, c) barrera intermedia, d) doble barrera en configuración axial, e) barrera sencilla en configuración axial f) barrera intermedia en configuración axial.....	18
Figura 1.6. Mecanismos de producción y Flujo de especies Cargadas en una DBD.....	19
Figura 1.7. DLEPA generada entre dos electrodos plano paralelos.....	20
Figura 2.1. Esquema de una fuente tradicional para generar arcos eléctricos a través de un tubo.....	22
Figura 2.2. Diseño preliminar del reactor y sistema de tratamiento de residuos...	24
Figura 2.3. Circuito inicial de control y potencia.....	28
Figura 2.4. Circuito modificado de control y potencia.....	29
Figura 2.5. Señal de salida del circuito de control.....	31
Figura 2.6. Señal de salida del circuito de control.....	31
Figura 2.7. Señal de salida del circuito de control.....	31
Figura. 2.8. Fotografía del circuito de control.....	32
Figura. 2.9. Fotografía del circuito de potencia.....	32
Figura 2.10. Diagrama de la fuente switching.....	33



Figura 2.11. Diagrama de la fuente switching.....	33
Figura 2.12. Señal de la corriente de salida de la fuente switching.....	34
Figura 2.13. Señal del voltaje de salida de la fuente switching.....	34
Figura 2.14. Fuente switching conectada al circuito generador con carga.....	35
Figura 2.15. Señal de salida de la fuente switching con carga.....	36
Figura 2.16. Diagrama de la fuente Protek 3003B.....	37
Figura 2.17. Diagrama de la fuente Protek 3003B.....	37
Figura 2.18. Señal del voltaje de salida de la fuente PROTEK 3003B.....	38
Figura 2.19. Señal de la corriente de salida de la fuente PROTEK 3003B.....	38
Figura 2.20. Fuente PROTEK 3003B conectada al circuito generador con carga.....	39
Figura 2.21. Señal de salida de la fuente PROTEK 3003B con carga.....	40
Figura 2.22. Esquema de la fuente con LM317.....	41
Figura 2.23. Diagrama de la fuente con LM317.....	43
Figura 2.24. Señal del voltaje de salida de la fuente con LM317.....	44
Figura 2.25. Señal de la corriente de salida de la fuente con LM317.....	44
Figura 2.26. Circuito de la fuente con LM317 (con carga).....	45
Figura 2.27. Señal de salida de la fuente con LM317 con carga.....	46
Figura 2.28. Fotografía del transformador reductor TR6. Fuente.....	47
Figura 2.29. Fotografía del transformador elevador de alto voltaje.....	48
Figura 2.30. Respuesta del transformador.....	49
Figura 2.31. Fotografía del dispositivo de conmutación.....	50
Figura 2.32. Fotografía del banco de condensadores.....	50
Figura 2.33. Diagrama de bloques del filtrado y rectificación de la señal.....	51
Figura 2.34. Rectificador de puente.....	52
Figura 2.35. Señal de onda completa.....	53
Figura 2.36. Esquemático de la fuente final de energía.....	55
Figura 2.37. Señal del voltaje de salida de la fuente final.....	56
Figura 2.38. Señal de la corriente de salida de la fuente final.....	56
Figura 2.39. Fuente final conectada al circuito generador de arcos eléctricos.....	57



Figura 2.40. Fotografía de la fuente final conectada al circuito generador.....	58
Figura 2.41. Señal de salida de la fuente final con carga.....	58
Figura 2.42. Arco eléctrico.....	59
Figura 2.43. Arco eléctrico en gas confinado.....	60
Figura 2.44. Arco eléctrico en cigarrillo.....	60
Figura 2.45. Residuo del cigarrillo.....	61
Figura 2.46. Grano de café tratado.....	61
Figura 2.47. Icopor tratado.....	62
Figura 2.48 Plástico tratado.....	62
Figura 2.49. Papel plastificado tratado.....	63
Figura 2.50. Fotografía de los reactores.....	65
Figura 2.51. Conexión interna de los reactores.....	65
Figura 2.52. Fotografía de la parte interna de los dos reactores.....	66
Figura 2.53. Fotografía de los reactores.....	66



LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1.1. Clasificación de procesos de descarga.....	9
Tabla 1.2. Parámetros característicos de las descargas luminiscentes.....	20



LISTA DE ANEXOS

	Pag.
ANEXO A. Especificaciones del LM317.....	72
ANEXO B. Especificaciones del IRF 840.....	75
ANEXO C. Especificaciones del IRFP 260N.....	77
ANEXO D. Especificaciones del LM7812.....	78
ANEXO E. TIP35.....	81
ANEXO F. TIP42.....	83
ANEXO G. LM555.....	84
ANEXO H. LM556.....	87



GLOSARIO

Arco eléctrico: Sinónimo de arco voltaico. Descarga luminosa que se produce por el paso de la carga eléctrica entre dos electrodos o conductores (de electricidad), los cuales no están en contacto directo entre sí; descarga eléctrica luminosa entre dos electrodos en el seno de un gas que se ioniza.

Asociativo: Que asocia o que resulta de una asociación o tiende a ella.

Axial: Perteneciente o relativo al eje.

Biocidas: sustancias químicas sintéticas, naturales o de origen biológico o de origen físico y están destinados a destruir, contrarrestar, neutralizar, impedir la acción o ejercer un control de otro tipo sobre cualquier microorganismo considerado nocivo para el hombre.

Biometanización: Tratamiento anaerobio de las partes biodegradables de los residuos de envases, que produce metano y residuos orgánicos estabilizados.

Catódica: Perteneciente o relativo al cátodo (electrodo negativo de una célula electrolítica hacia el que se dirigen los iones positivos).

CIIU: Código Internacional de Industria Uniforme.

Colisional: (del verbo colisionar) Chocar dos o más vehículos con violencia, Enfrentarse u oponerse.



Criba: Cuero ordenadamente agujereado y fijo en un aro de madera, también se fabrica de plancha metálica con agujeros, o con red de malla de alambre, para separar las partes menudas de las gruesas.

DAMA: Departamento Administrativo del Medio Ambiente.

DBD: Descargas de Barrera Dieléctrica.

Descarga: Pérdida de carga eléctrica.

Desfibrado: Acción y efecto de desfibrar, Quitar las fibras a las materias que las contienen, como las plantas textiles, maderas, etc.

Disociativa: Separar una cosa de otra con la que estaba unida.

DLEPA: Descargas Luminiscentes Estables a Presión Atmosférica.

Electrodos: Extremo de un conductor en contacto con un medio, al que lleva o del que recibe una corriente eléctrica.

Electrón: partícula ligera, llevando carga eléctrica negativa y encontrada en todos los átomos. Los electrones pueden ser energizados o separados de los átomos a través de luz o impactos (colisiones), y son responsables por muchos fenómenos eléctricos en materia sólida y en plasmas.

Electrones: Partículas de electrón cargadas negativamente que giran alrededor del núcleo de un átomo.

Fenomenología: Método filosófico desarrollado por Edmund Husserl que, partiendo de la descripción de las entidades y cosas presentes a la intuición intelectual, logra captar la esencia pura de dichas entidades, trascendente a la misma consciencia.



Filamentaria: (del filamento) Cuerpo en forma de hilo, flexible o rígido.

Fusionable: (fusión) Reacción nuclear en la que los núcleos de los átomos pesados se unen para formar otros más pesados con gran liberación de energía.

Interelectrónico: Espacio intermedio entre electrones.

Ionósfera: región cubriendo las capas más altas de la atmósfera de la Tierra, conteniendo una población considerable de iones y electrones libres.

Luminiscente: Que tiene luminiscencia. (Propiedad de despedir luz sin elevación de temperatura y visible casi solo en la oscuridad, como la que se observa en las luciérnagas, en las maderas y en los pescados putrefactos, en minerales de uranio y en varios sulfuros metálicos).

Magnetopausa: El límite de la magnetósfera, que separa el plasma unido a la Tierra del que viaja con el viento solar.

Magnetósfera: La región alrededor de la Tierra, limitado por la magnetopausa, en los que sus procesos son dominados por el campo magnético terrestre.

Micro esfera: Esfera de tamaño microscópico.

Patogenicidad: Capacidad de un agente infeccioso de producir enfermedad en un huésped susceptible.

Plaguicidas: Son sustancias químicas utilizadas para controlar, prevenir o destruir las plagas que afectan a las plantaciones agrícolas.



Protón: con un ion de hidrógeno; partícula atómica elemental de carga equivalente a la del electrón pero positiva e indivisible, que, por sí sola, constituye el núcleo del átomo de hidrógeno.

Radiactiva: Que tiene radiactividad (Propiedad de ciertos cuerpos cuyos átomos, al desintegrarse espontáneamente, emiten radiaciones. Su unidad de medida en el Sistema Internacional es el *becquere*).

RF: Radio Frecuencia.

Te: Temperatura electrónica.

Termoiónica: Pertenece o relativo a la emisión de los electrones provocada por el calor.

Tg: Temperatura del gas.

Ti: Temperatura iónica.

Traslacional: (de traslación) Acción y resultado de trasladar o trasladarse.

Vibracional: (de vibración) Cada uno de los movimientos vibratorios o doble oscilación de las moléculas o partículas de un cuerpo elástico, que pasa por una posición central de equilibrio.

Vitrocerámica: Se dice de los materiales formados por vidrio y óxidos de titanio o circonio a temperaturas elevadas, de gran estabilidad y resistencia térmica.



ABSTRACT

The process of design of high voltage source to obtain electric arcs through of stages simulation sources, assembly, test run and verification of stocks, by analysing results of all of those tests, was possible to obtain the final design and realization of some simulations and operation's tests to ensure the supply of energy from the source to achieve generation of electric arcs for a long time and through this source, obtain the high-voltage, obtaining the ionization of gases that are injected inside reactor specified in the project "STUDY OF THE FEASIBILITY OF THE USE OF PLASMA AS A TOOL OF WASTE TREATMENT", which belongs to the RESEARCH GROUP ON APPLIED INSTRUMENTATION of the University Pontificia Bolivariana; and they are who evaluate the feasibility of waste disposal through plasma's technology

The ionization of gas is base for obtain plasma, therefore, the design of the high voltage source that produces the electric arcs, is an important part of the plasma's investigation, and it is a reason for in this work we can find a basic study about this phenomenon, type of wastes, type of electric arcs and a complete design of the source that supplies energy and power to the control circuit, which generates some experiments with elements exposed to the electric arcs, with their respective comments and conclusions for the development of the work.



RESUMEN

El proceso de diseño de la fuente de alto voltaje para la generación de arcos eléctricos se dio mediante una serie de etapas de simulación de fuentes, montaje, pruebas de funcionamiento y verificación de las mismas; mediante el análisis de resultados obtenidos en las pruebas realizadas a las fuentes implementadas, se llegó a la obtención del diseño final y la realización de una serie de simulaciones y pruebas de funcionamiento, que garantizan el suministro de energía de la fuente para lograr la generación de arcos eléctricos por un tiempo prolongado y mediante esta fuente, obtener la generación de alto voltaje, logrando la ionización de los gases que se inyecten al reactor especificado en el proyecto “Estudio de Factibilidad de la Utilización del Plasma como Herramienta de Tratamiento de Residuos”, el cual pertenece al grupo de investigación en Instrumentación Aplicada de la Universidad Pontificia Bolivariana; y que evalúa la factibilidad de la eliminación de residuos mediante la tecnología del plasma.

La ionización de los gases es la base para la obtención del plasma, por tanto, el diseño de la fuente de alto voltaje que genera los arcos eléctricos encargados de ionizar los gases, es una pieza fundamental en la investigación del plasma, razón por la cual en este trabajo se encuentra un estudio básico de este fenómeno, tipo de residuos, tipos de arcos eléctricos y el diseño completo de la fuente que suministra la energía al circuito de control y potencia que se encargan de generar los arcos eléctricos, complementado por una serie de experimentos con elementos expuestos al arco eléctrico obtenido, con sus respectivas observaciones y conclusiones sobre el desarrollo del trabajo.



INTRODUCCIÓN

La tecnología sirve para dar solución a los problemas de la vida diaria, uno de estos son los desechos y requieren de soluciones eficientes, como lo es la implementación del plasma como herramienta en el tratamiento de residuos. El plasma es el cuarto estado de la materia, el cual consiste en un gas donde los átomos están ionizados, constituyendo una mezcla eléctricamente neutra con igual número de cationes (+) y de electrones (-). Este fenómeno se obtiene con la generación de un arco eléctrico de alto voltaje del orden de los 3.000 voltios y la interacción de un gas, además provoca altas temperaturas del orden de los 10.000K Kelvin cuando este se genera.

Para implementar la tecnología del plasma, es indispensable tener bases sólidas sobre el tema; por tal razón en la primera parte del texto se encuentra una breve ilustración sobre el plasma, para contextualizar el objetivo y orientación del proyecto, que consiste en el diseño de una fuente de alto voltaje para generar arcos eléctricos, con la cual se logra reproducir el plasma. El diseño de esta fuente se realiza por medio de una serie de pruebas a diferentes prototipos de fuentes de voltaje, para garantizar el suministro de energía a los circuitos de control y potencia; posteriormente se efectúa el análisis de resultados de las fuentes implementadas, el cual ayuda a obtener el diseño que cumple con los requerimientos establecidos de funcionamiento de la fuente de alto voltaje y el suministro de energía requerida para lograr el arco eléctrico de forma permanente sin interrupción y mal funcionamiento de la fuente .

Con la obtención del arco eléctrico en un prototipo preliminar, se efectuó una serie de pruebas de funcionamiento de la fuente que garantiza la estabilidad de esta por un periodo considerable con la obtención del arco electrico.



Igualmente se analizó el efecto del arco eléctrico generado por la fuente, utilizando como gas el aire, mediante algunas pruebas de interacción del arco, con elementos tales como el cigarrillo, icopor, papel, plástico y café.

Todo lo anteriormente nombrado sobre el diseño de la fuente, contribuye al proyecto de investigación denominado **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA UTILIZACIÓN DEL PLASMA COMO HERRAMIENTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS**, perteneciente al grupo de investigación en *Instrumentación Aplicada* de la Universidad Pontificia Bolivariana, el cual tiene como objetivo investigar y analizar el efecto que tiene el plasma cuando interactúa con diferentes residuos sólidos.



1. GENERALIDADES

Dentro del campo de las nuevas tecnologías de la industria nace el uso del plasma, el cual se emplea como método de análisis químico en la detección de compuestos, en la fabricación de circuitos integrados de semiconductores, en la luminotecnia, templado de piezas industriales, en la metalurgia, en recubrimientos anticorrosivos, obtención de superconductores, etc.

La tecnología del plasma se ha extendido también hacia la eliminación de residuos. Este sector, se encuentra a nivel mundial en una fase todavía muy inicial, existiendo muy pocas instalaciones industriales de este tipo.

En la actualidad, existen diversos métodos de eliminación de residuos, los cuales dependen del tipo de desechos que se requiere eliminar. Dentro de estos métodos; el método de eliminación de residuos mediante vertido controlado que consiste en almacenar residuos en capas en lugares excavados, es el método más utilizado. Aquí es fundamental elegir el terreno adecuado para que no se produzca contaminación ni en la superficie ni en aguas subterráneas; debida a filtraciones. Además la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos genera gases. Si se concentra una cantidad considerable de metano pueden producirse explosiones, por lo que el vertedero debe tener buena ventilación. Técnicas más recientes apuestan por el aprovechamiento de estos gases procedentes de la descomposición como recurso energético

Otro método es el de las incineradoras convencionales, como hornos o cámaras refractarias en las que se queman los residuos; los gases de la combustión y los sólidos que permanecen se queman en una segunda etapa. Los materiales combustibles se queman en un 90%. Además de generar calor, utilizable como fuente energética, la incineración genera dióxido de carbono, óxidos de azufre y nitrógeno y otros contaminantes gaseosos, cenizas volátiles y residuos sólidos sin quemar.



Es posible recuperar energía de algunos procesos de eliminación de residuos. En general se pueden hacer dos grupos: procesos de combustión y procesos de pirolisis.

La pirolisis o destilación destructiva es un proceso de descomposición química de residuos sólidos mediante calor en una atmósfera con poco oxígeno. Esto genera una corriente de gas compuesta por hidrógeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono, ceniza inerte y otros gases, según las características orgánicas del material pirolizado.

En la actualidad los materiales reciclables se recuperan de muchas maneras, como el desfibrado, la separación magnética de metales, separación de materiales ligeros y pesados, criba y lavado. Otro método es la reducción a pulpa. Los residuos se mezclan con agua y se convierten en una sustancia pastosa que al transitarlos por un triturador, los trozos de metal se extraen con dispositivos magnéticos y la pulpa que resulta se introduce en una centrifugadora. Aquí se separan los materiales más pesados, como trozos de cristal, y se envían a sistemas de reciclado; otros materiales más ligeros se mandan a plantas de reciclado de papel y fibra, y el residuo restante se incinera o se deposita en un vertedero.

Algunas sustancias biológicas, los compuestos químicos tóxicos e inflamables y los residuos radiactivos son peligrosos. Estas sustancias pueden ser gaseosas, líquidas, semisólidas, sólidas o gaseosas. Este tipo de residuo no se elimina, solo se almacena dentro de contenedores en lugares protegidos.

La eliminación mediante el plasma se presenta como un medio nuevo y de gran eficacia para el tratamiento de los residuos, especialmente los considerados como peligrosos. Este a diferencia de los métodos antes expuestos, es un proceso de atomización de la materia, que no produce emisiones contaminantes a la atmósfera, ni cenizas. Por otra parte y, en similitud con los procesos de



combustión, es posible la recuperación de calor para la obtención de energía eléctrica.

En el caso de la eliminación de residuos, el plasma se encuentra a temperaturas extremas, superiores a los tres mil grados, obtenidas a partir del calentamiento mediante un arco eléctrico. Al introducir cualquier tipo de residuo en un horno de plasma a altas temperaturas y energías, se consiguen destruir sus moléculas estables, desintegrando prácticamente el residuo original, convirtiéndolo en una masa vitrocerámica, de propiedades físico-químicas completamente diferentes a las iniciales, la cual posteriormente puede ser empleada en la construcción en diferentes formas, como mobiliario urbano ó como elemento decorativo, entre otras. En el proceso solo quedan gases simples. [1]

Residuos y clasificación. [2]

Su denominación cambia dependiendo del país o el ente encargado de su manejo. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Decisión y Recomendación del Consejo del Primero de Febrero de 1984. (Yakowitz, 1985), define "*Residuo*" se refiere a cualquier material considerado como desecho o legalmente definido como residuo en el país donde está ubicado, a través del cual o al cual es transportado.

- Clasificación por estado
- Clasificación por origen
- Residuos industriales
- Inertes
- Residuos sólidos urbanos
- Residuos peligrosos
- Residuos
- Residuos médicos y de laboratorios
- Residuos radiactivos.



Manejo de residuos a nivel mundial

Para enfrentar la problemática alrededor del tema, existen diferentes tecnologías para clasificar y tratar los residuos. En países como Alemania se prefieren hacer incineraciones a altas temperaturas que disponen los residuos en rellenos sanitarios. Por otra parte en Latinoamérica Brasil, es el país más adelantado en la clasificación de los residuos de acuerdo con los códigos CIU (Código Internacional de Industria Uniforme), en donde se clasifican como peligrosos, inertes y no inertes. En México se optó por la utilización de tecnologías limpias para evitar la generación de residuos que incidan sobre el ambiente.

Utilización de plasma como herramienta de tratamiento de residuos.

La técnica de eliminación de residuos por medio del plasma, se encuentra a temperaturas extremas, superiores a los tres mil grados, obtenidas a partir del calentamiento mediante un arco eléctrico. Al introducir cualquier tipo de residuo en un horno de plasma a altas temperaturas y energías, se consiguen destruir sus moléculas estables, desintegrando prácticamente el residuo original, convirtiéndolo en una masa vitrocerámica, de propiedades físico-químicas completamente diferentes a las iniciales.

1.1 EL PLASMA

Para un entendimiento completo sobre el plasma, es importante tener claro todos los aspectos que encierra este tema, enfocando nuestro sentido en una sola dirección y entendiendo las discrepancias que presenta hablar de los diferentes tipos de plasma.

Cuando a la sangre se le eliminan todos los glóbulos queda un líquido claro, denominado "plasma" por el gran médico científico checo Johannes Purkinje (1787-1869). El uso del término "plasma" para nombrar a un gas ionizado se inició en 1927 por Irving Langmuir (1881-1957), quien ganó el Premio Nobel de química de 1932. Langmuir trabajó para la General Electric Co., estudiando dispositivos



electrónicos basados en los gases ionizados. La forma en que los fluidos electrificados transportaban electrones de alta velocidad, iones y las impurezas le recordaron la forma en que el plasma sanguíneo transporta los glóbulos rojos y blancos, y los gérmenes.

Con más precisión, el plasma se puede definir como un gas de partículas neutras y cargadas que es *casi neutro* y que presenta un comportamiento colectivo. Este comportamiento colectivo se debe al largo alcance de las fuerzas eléctricas y a que la existencia de cargas móviles puede provocar que se produzca una ligera pérdida local de la neutralidad espacial lo que origina campos eléctricos a los que se ven sometidas las cargas. También, como consecuencia del movimiento de las mismas se producen campos magnéticos que ejercerán acciones dinámicas sobre las cargas.

Precisamente el nombre “plasma” parece estar relacionado con la posibilidad de “dar forma” (plasmar) empleando campos eléctricos y magnéticos evitando así la necesidad de un contenedor o recipiente como es el caso de los fluidos, líquidos o gases. [2].

Es frecuente utilizar el término cuarto estado de la materia para los Plasmas, además de los sólidos, líquidos y gases (Ver figura 1.1).

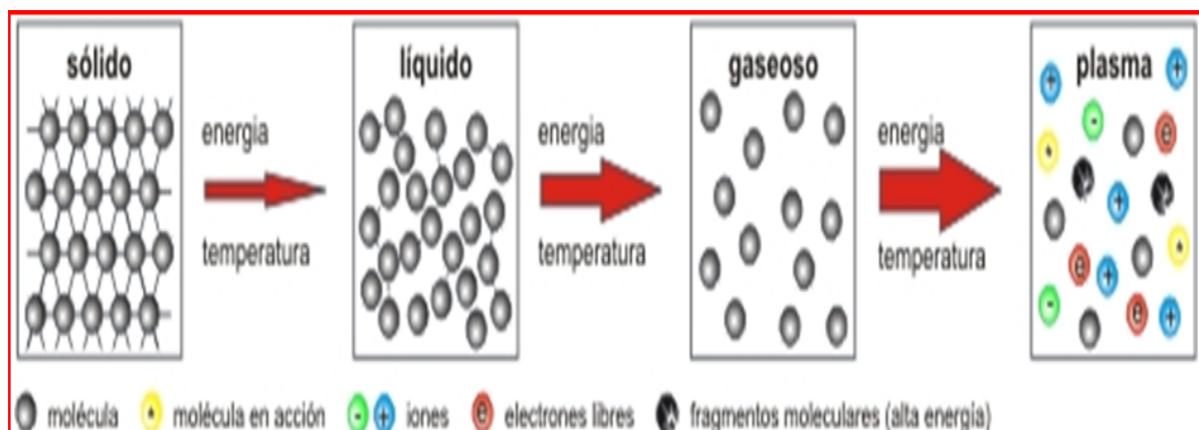


Fig. 1.1. Estructura de los Estados de la Materia. [15]



Gran parte del universo esta formado de plasma y el conocimiento de los procesos astrofísicos requieren de una mejor comprensión de la física del plasma. Esto aplicado particularmente al Sol, cuyas manchas intensamente magnéticas producían muchos fenómenos magnéticos complicados, como las erupciones solares.

Existen diversas variantes del plasma, dependiendo del uso al que se destine, este se obtiene si se le aporta más energía al gas, éste se ioniza y se convierte en plasma. Un gas que contiene cierta parte de sus átomos básicos ionizados y se caracteriza por contener gran cantidad de energía, siendo éste un buen conductor eléctrico y reactivo químico.

En otras palabras, el plasma es generado en los gases, calentándolos, aplicando un voltaje, o inyectando ondas electromagnéticas. Como resultado de esto, las partículas del gas que se utiliza, los átomos y las moléculas, adquieren energía cinética traslacional (3D) y de forma simultánea adquieren energías cinéticas vibracional y rotacional. Las fuertes interacciones eléctricas que se dan con el entorno y entre las partículas, genera un comportamiento bastante diferente al de un gas ordinario. [2].

Por otra parte, hay otra forma de clasificar el plasma si sabemos el voltaje de los electrodos, la sustancia y el estado del gas (presión, temperatura), se puede saber qué tipo de plasma se puede obtener. De acuerdo a la tabla 1.1 de rangos de frecuencias y el tipo de plasma. [19]



	ANÁLISIS	DESEQUILIBRIO DEL PLASMA	EQUILIBRIO DEL PLASMA
Constante campo eléctrico	Inicia con una descarga luminiscente en tubos	Columna positiva de descarga luminiscente	Columna positiva de alta presión en arco
Radio Frecuencias	Inicia con una descarga de RF en recipientes llenos de gases	Capacidad de descarga doble de RF en gases enrarecidos	Inducción doble de plasma de antorcha
Rango de microondas	Interrupción en guías de ondas y resonadores	Descarga de microondas en gases enrarecidos	Microondas del plasma
Rango óptico	Interrupción de gases por radiación láser	Etapas finales de interrupción Óptica	Descarga óptica continua

TABLA 1.1. Clasificación de procesos de descarga [19]

En la Tierra nos encontramos con el ejemplo más conocido del plasma, que es el canal conductor de los rayos y relámpagos, los parámetros típicos del rayo son:

- Diámetro del canal conductor ≈ 5 cm
- Longitud del canal ≈ 3 km
- Corriente ≈ 200 kA
- Temperatura ≈ 30.000 K
- Duración $\approx 1E-4$ s
- Velocidad de movimiento $\approx 0,1$ c (30.000 km s⁻¹)
- Energía $\approx 6 \times 10^8$ J
- Área de condensación de carga ≈ 3.000 km³

En otros planetas se encuentran rayos más grandes, en Venus los rayos tienen una energía total de 2×10^{10} J y en Júpiter hasta 3×10^{12} J.



Fig.1.2. Imagen del fenómeno del rayo. [20]

El plasma es también creado artificialmente e investigado en los laboratorios. El hombre actual puede crear plasmas fácilmente, incluso en el laboratorio. Los ejemplos más típicos son:

- plasma láser – tiempo de vida: 10^{-12} a 10^{-9} s
- plasma pulsante – tiempo de vida: 10^{-9} a 10^{-6} s
- Tokamak – tiempo de vida: 1 s
- plasma frío – tiempo de vida: horas, días, años

Parámetros básicos del plasma. [2].

Puesto que existen plasmas en contextos diferentes y con diversas características, es importante definir apropiadamente los parámetros que deciden el comportamiento de un plasma los cuales son:

Neutralidad y especies presentes: Generalmente un plasma está formado por igual número de cargas positivas y negativas, lo que anula la carga total del sistema. En tal caso se habla de un plasma neutro o casi-neutro. También existen plasmas no neutros o inestables, como el flujo de electrones dentro de un acelerador de partículas, pero requieren algún tipo de confinamiento externo para vencer las fuerzas de repulsión electrostática.



Los plasmas más comunes son los formados por electrones e iones. En general puede haber varias especies de iones dentro del plasma, como moléculas ionizadas (cationes) y otras que han capturado un electrón y portan una carga negativa (aniones).

Longitudes: La longitud de Debye o de apantallamiento electromagnético (λ_D) establece el rango típico de las interacciones electrostáticas de una determinada especie. Suponiendo una carga positiva presente en un plasma de electrones e iones. Los electrones serán atraídos y formarán una capa de carga negativa alrededor de ella. A partir de cierta distancia la carga habrá quedado neutralizada y no tendrá efectos apreciables. La longitud de Debye es una estimación de esta distancia.

$$\lambda_D = \sqrt{\left(\frac{kT}{4\pi n_e^2} \right)} \quad (1.1)$$

Donde: k simboliza la constante de Boltzmann, n_e la densidad del gas y T_e la temperatura

Otra longitud trascendente en un plasma es el camino libre medio o la distancia media entre colisiones.

La frecuencia de plasma (ω_{pe}): Describe sus tiempos característicos. Supóngase que en un plasma en equilibrio y sin densidades de carga se introduce un pequeño desplazamiento de todos los electrones en una dirección. Éstos sentirán la atracción de los iones en la dirección opuesta, se moverán hacia ella y comenzarán a oscilar en torno a la posición original de equilibrio. La frecuencia de tal oscilación es lo que se denomina frecuencia de plasma. La frecuencia de plasma de los electrones es:

$$\omega_{pe} = \left(\frac{4\pi n_e e^2}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

Donde m_e es la masa del electrón y e su carga.



Temperatura (velocidad térmica): Generalmente las partículas de una determinada especie localizadas en un punto dado no tienen igual velocidad; presentan por el contrario una distribución que en el equilibrio térmico es descrita por la distribución de Maxwell-Boltzmann. A mayor temperatura, mayor será la dispersión de velocidades (más ancha será la curva que la representa).

Una magnitud de tal dispersión es la velocidad cuadrática media que, en el equilibrio, se denomina también velocidad térmica, Aunque podría ser incorrecto, hablar también de velocidad térmica y de temperatura en plasmas lejos del equilibrio termodinámico. De todas formas, se menciona la temperatura que correspondería a una velocidad cuadrática media determinada. La velocidad térmica de los electrones es:

$$v_{Te} = \left(\frac{kT_e}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

El parámetro: El parámetro de plasma (Γ) indica el número medio de partículas contenidas en una esfera cuyo radio es la longitud de Debye (esfera de Debye). La definición de plasma, según la cual la interacción electromagnética de una partícula con la multitud de partículas distantes domina sobre la interacción con los pocos vecinos próximos, se puede escribir en términos del parámetro de plasma de la siguiente manera, $\Gamma \gg 1$ Que indica que hay una gran cantidad de partículas contenidas en una esfera de Debye y se conoce como "condición de plasma".

Se encuentra en algunos autores una definición inversa del parámetro de plasma ($g = 1 / \Gamma$), con lo que la condición de plasma resulta ser $g \ll 1$.

El parámetro de plasma de los electrones es:

$$\Gamma = \left(\frac{4\pi}{3} \right) n_e \lambda_D^3 \quad (1.4)$$



1.2 TIPOS DE DESCARGAS. [2].

Las descargas en gases pueden ocurrir en un amplio rango de presiones de gas, llevando corrientes desde valores muy pequeños hasta 10^6 A. Las descargas, en estado estable pueden ser clasificadas de acuerdo con la corriente que lleven en:

- Descarga Townsend o descarga oscura con corrientes del orden de 10^{-6} A.
- Descarga luminiscente con corrientes desde 10^{-6} A hasta 10^{-1} A
- Descargas de Arco con corrientes del orden de los 10^{-1} A y más

El modelo utilizado para clasificarlas esta basado en las descargas generadas en un campo DC. Como se muestra en la figura 1.3

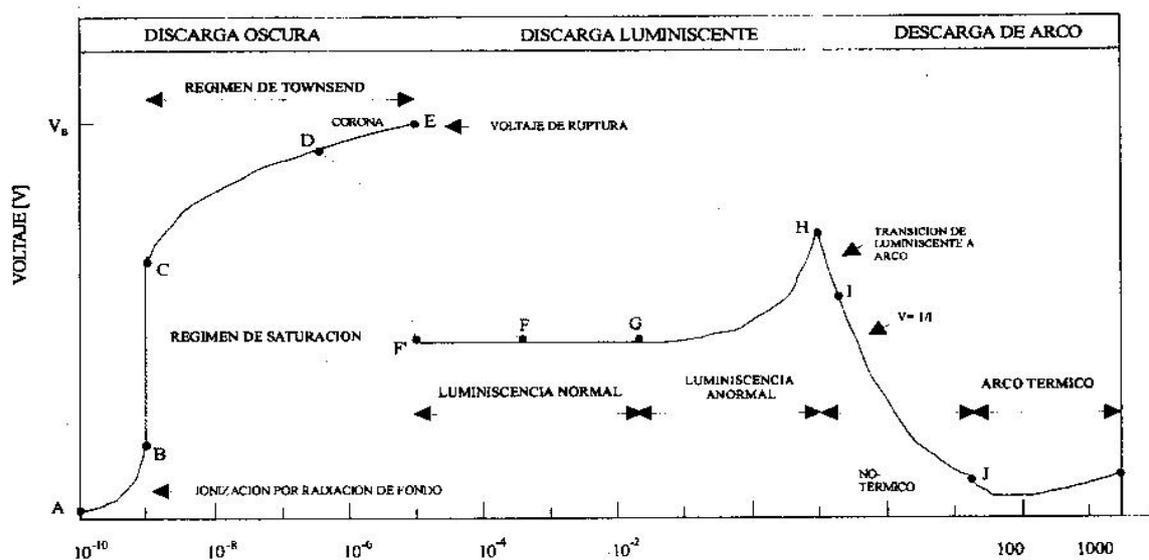


Fig.1.3. característica voltaje- corriente [2].

Descarga Townsend o Descarga Oscura.

Recibe su nombre del hecho de que con excepción de las descargas de corona más energéticas, esta no emite la suficiente cantidad de luz para ser detectada por el ojo humano; en este régimen la densidad de especies excitadas es demasiado pequeña de tal forma que la luz emitida por excitación no es visible, este tipo de descarga se subdivide en:



- **Ionización de fondo.**
- **Régimen de saturación.**
- **Descarga Townsend.**
- **Descarga de corona.**

Descarga Luminiscente.

Este régimen obedece su nombre al hecho de que el plasma es luminoso. Esta luminosidad se alcanza debido a que la energía y la densidad electrónicas son suficientemente altas para generar luz visible por excitación en colisiones. Cuando el voltaje a través del tubo de descargas es aumentando en el régimen de descarga oscura, descrita anteriormente, la corriente aumenta en forma exponencial en la descarga Townsend. Cuando se aproxima al punto de ruptura del gas E en la figura 1.3, puede presentarse una de dos situaciones dependiendo de la resistencia interna de la fuente de energía: si la resistencia interna de la fuente es muy alta, tal que solo pueda liberar corrientes muy pequeñas, en el tubo de descargas no habrá una corriente suficiente para alcanzar el punto de ruptura del gas y el tubo permanecerá en el régimen de corona con pequeñas descargas que se hacen evidentes en los electrodos; si la resistencia de la fuente es relativamente baja, el gas alcanzará el voltaje de ruptura y el proceso pasará del régimen de descarga oscura al régimen de descarga luminiscente normal a baja presión. Después de la ruptura eléctrica del gas, un tubo de descargas a baja presión conectado a una fuente con baja resistencia interna, hará una transición discontinua desde el punto E al punto F de la figura 1.3, La región a la derecha del punto F es casi uniforme y voltaje a través del tubo de descargas se eleva solo ligeramente, mientras que la corriente cambia en varios órdenes de magnitud. La región desde F hasta G en la figura se llama zona de descarga luminiscente normal; en este régimen el voltaje y la densidad de corriente que alcanza los electrodos son relativamente independientes de la corriente total en el tubo de descargas lo que significa que en el régimen de descarga luminiscente normal del plasma está en contacto solamente con una pequeña parte de la superficie catódica a bajas corrientes; a medida que la corriente crece, la superficie de



contacto abarca más partes de la sección transversal total hasta que en el punto G el límite de descarga luminiscente anormal. El plasma cubre toda la superficie catódica, para así liberar la corriente total a una densidad de corriente constante.

En la zona más allá del límite de descarga luminiscente anormal, el voltaje crece significativamente con el incremento de la corriente total elevando la densidad de corriente catódica por encima de su valor normal y suministrando así la corriente deseada. En el punto H los electrodos estarán suficientemente calientes de tal forma que el cátodo emite electrones secundarios por emisión termoiónica. Si la fuente tiene una resistencia suficientemente baja, la descarga caerá en la zona de transición de luminiscencia-arco.

Descarga de Arco.

Cuando una descarga eléctrica exhibe corrientes del orden de 1 a 10 Amperios. a baja presión, es algunas veces difícil de distinguir si es una descarga de arco o una descarga luminiscente. Las descargas de arco están definidas en términos de su luminosidad, densidad de corriente y caída de voltaje. Una descarga de arco a diferencia de la luminiscente es altamente luminosa, especialmente los arcos térmicos de alta densidad; la densidad de corriente en los arcos oscila entre decenas y centenas de amperios por centímetro cuadrado; presentan además una caída de potencial baja, $\approx 10V$ o menos. Dentro de este régimen pueden apreciarse tres divisiones: la región de transición de luminiscente a arco entre los puntos H-I, la cual es activada por la emisión electrónica del cátodo; esta emisión es producto de las altas temperaturas del cátodo que ocurre en las regiones de alta densidad de corriente de la descarga luminiscente anormal, alrededor del punto H de la curva. Cuando la descarga se establece en el punto I de la curva, el cual es establecido por la impedancia interna de la fuente y está asociado al circuito, el arco será no térmico. Esta división se caracteriza por corrientes totales entre 1 y 50A.



Las descargas eléctricas DC descritas, muestran una corriente real en forma de un flujo de iones o electrones. Los procesos físicos en tales descargas están dominados por los campos eléctricos DC axiales. La situación no cambia demasiado al aplicar a los electrodos un voltaje AC de baja frecuencia del orden de 50 o 60Hz; el período de la frecuencia aplicada es mucho mayor que el tiempo que emplean los procesos físicos en el plasma, por lo tanto tales descargas pueden ser tratadas como si fueran descargas DC.

Diferentes Técnicas para la Obtención de Plasma.

- **Plasma de Arcos Eléctricos en Gases.**

El plasma en equilibrio se caracteriza por los parámetros termodinámicos, temperatura y presión global.

En los plasmas obtenidos por descargas eléctricas gaseosas, las especies cargadas son los iones y los electrones, este es generado durante la ruptura dieléctrica del gas cuando los electrones primarios son acelerados por el campo eléctrico aplicado. Estos electrones energizados ionizan las especies átomos y moléculas componentes del gas y producen iones y nuevos electrones. Dado que los porcentajes de ionización en los gases no supera el 0.1% estos electrones experimentan colisiones principalmente con las especies neutras del gas. Ahora bien, teniendo en cuenta las secciones eficaces de las especies que colisionan, puede concluirse que la transferencia de energía es muy ineficiente: colisiones inelásticas entre electrones y especies pesadas.

A bajas presiones de gas, la temperatura de las especies pesadas es muy cercana a la temperatura ambiente y el plasma generado se llama plasma frío. La temperatura electrónica en un plasma frío puede exceder la temperatura iónica hasta en dos órdenes de magnitud o más y el plasma representa un sistema que está lejos del equilibrio termodinámico.



El desequilibrio de los plasmas gaseosos se manifiesta de varias formas: a baja presión la mayoría de las reacciones químicas en el plasma está gobernada por los electrones cuya T_e excede la temperatura del gas T_g , estas dos temperaturas como se observa en la figura 1.3 emergen juntas gradualmente al incrementar la presión del gas, cuando sucede esto se dice que el plasma se aproxima al equilibrio termodinámico local. La presión a la cual T_g se acerca a T_e depende de la composición del gas.

La reversibilidad en las reacciones químicas inducidas por electrones es poco común, las especies generadas en un lugar desaparecen en otro debido a reacciones diferentes y como tal las paredes de la cámara de descargas y los electrodos sirven como sumidero de partículas cargadas; los electrones son absorbidos en las paredes y los iones son transformados en especies neutras. Entonces a bajas presiones, la densidad del plasma no es espacialmente uniforme y presenta un máximo en el centro y un decrecimiento hacia las paredes.

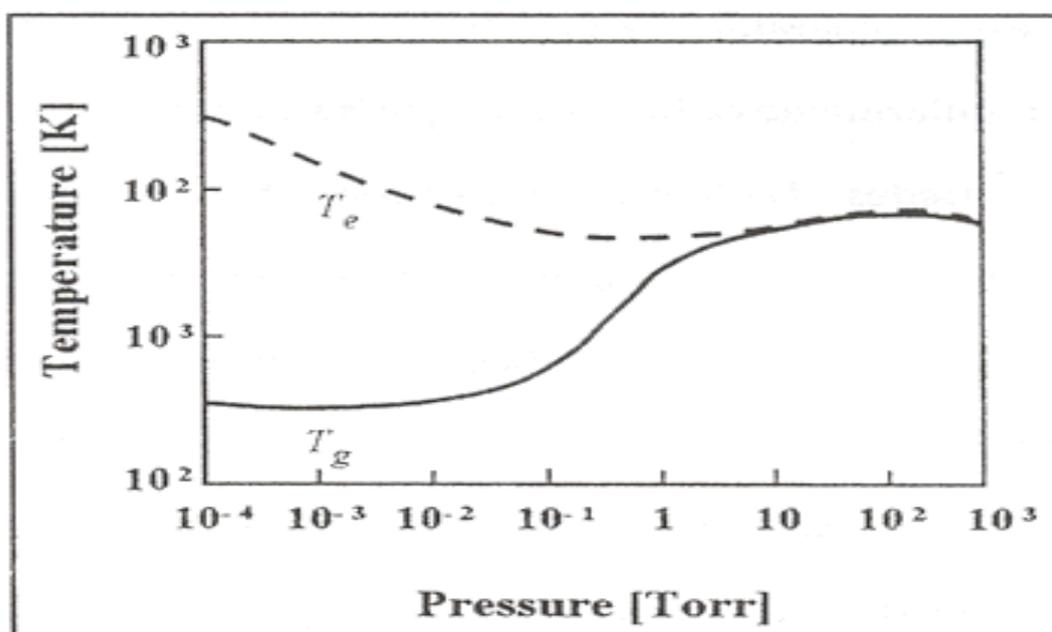


Fig.1.4. Temperaturas del gas y de los electrones en una descarga DC para una mezcla de gas noble y mercurio a diferentes presiones de gas e igual corriente. [2]



- **Descargas de Barrera Dieléctrica. (DBD).**

Las descargas de barrera dieléctrica DBD son un tipo especial de descargas generadas en campos AC o en campos RF que pueden operar en un amplio rango de presiones que va desde 0.01bar hasta 10bar.

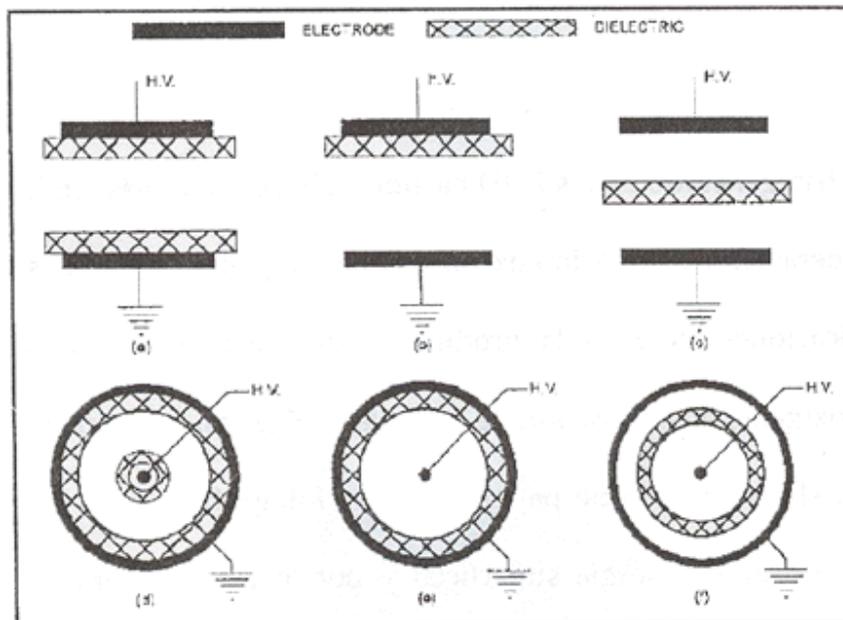


Fig.1.5. Configuraciones para la generación de DBD. a) doble barrera, b) barrera sencilla, c) barrera intermedia, d) doble barrera en configuración axial, e) barrera sencilla en configuración axial f) barrera intermedia en configuración axial. [2]

Los generadores de descarga de barrera dieléctrica son generados entre un par de electrodos recubiertos con dieléctrico o con este insertado entre ellos; no obstante, existen diferentes configuraciones y disposiciones geométricas como las mostradas en la figura 1.5 con el cual se puede obtener descargas de esta clase. Para todos los casos mostrados en esta figura 1.5 el gas de trabajo se distribuye en la región que separa los electrodos, la cual generalmente es de unos cuantos milímetros, haciéndose necesario aplicar potenciales que van desde 1kV hasta 100kV., frecuencias de oscilación entre los 50Hz y 1MHz, para generar y sostener la descarga y al igual que la disposición geométrica, la alimentación de energía dependerá del tipo de aplicación. El mecanismo de ruptura dieléctrica del gas



conduce a la formación de una gran cantidad de filamentos, cuyos diámetros oscilan entre 0.1mm y 0.5mm. la corriente esta limitada por el material dieléctrico entre los electrodos y el flujo de portadores de carga, proveniente del plasma así generado, permanece en la superficie del dieléctrico y compensa la acción del campo eléctrico aplicado y por lo tanto, el tiempo de vida media de los filamentos es muy corto entre 1 y 10ns. La figura 1.6 muestra la forma esquemática del proceso de formación de micro descargas o micro canales de carga, proceso que se repite mientras dure el suministro de energía y que además se presenta a lo largo y ancho de la superficie de los electrodos recubiertos con material dieléctrico.

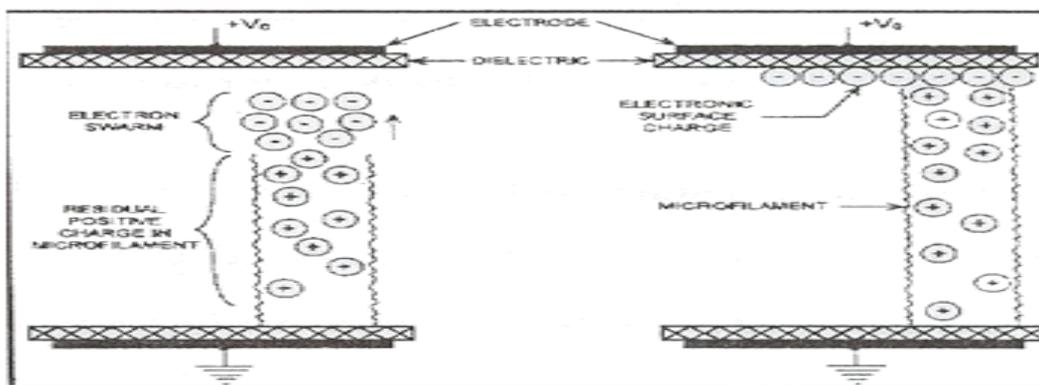


Fig. 1.6. Mecanismos de producción y flujo de especies cargadas en una DBD. [2]

La densidad característica de corriente en los filamentos oscila entre 100 y 1000Acm², la densidad electrónica entre 10¹⁴ y 10¹⁵ cm³ y las temperaturas electrónicas entre 1 y 10eV.

- **Descargas Luminiscentes Estables a Presión Atmosférica (DLEPA).**

En la figura 1.7 se muestra un esquema del arreglo experimental. Para generar una DLEPA es necesario cumplir con a) la aplicación de una señal de alto voltaje y alta frecuencia a un par de electrodos, b) los electrodos tienen una superficie dieléctrica, y c) están sumergidos en una atmósfera de Helio mezclado con aire ambiente. Condiciones que han hecho superar las limitantes técnicas y económicas de la utilización de reactores que requieren alto vacío.

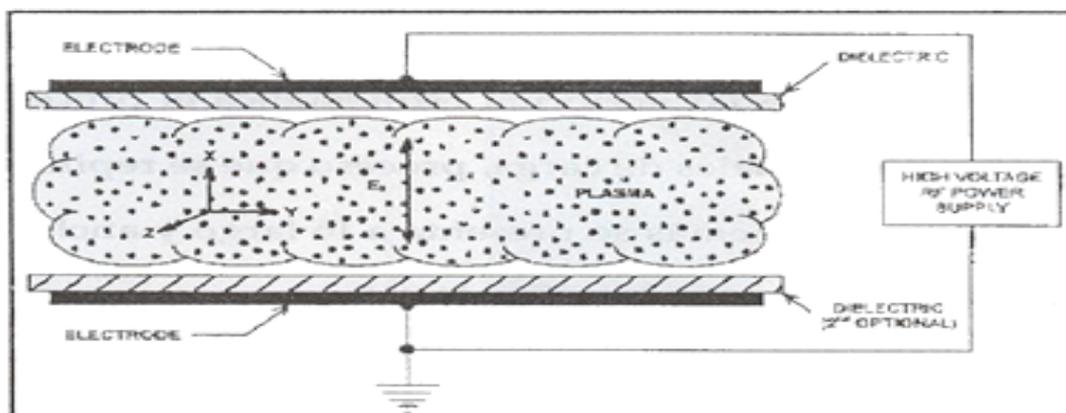


Fig. 1.7. DLEPA generada entre dos electrodos planos paralelos [2]

Adicionalmente, algunos grupos de investigación han orientado sus investigaciones hacia la obtención de DLEPA bajo diferentes condiciones experimentales a las establecidas inicialmente, en 1993 la condición de utilizar un generador de alta frecuencia se superó al reportarse que utilizando generadores de baja frecuencia 50Hz, también es posible generar un DLEPA.

Características principales.

En general, las DLEPA presentan las siguientes características que son listadas en la tabla 1.2:

Parámetro	Valor mínimo	Valor característico	Valor máximo
Presión del Gas (Torr)	1×10^{-5}	0.5	760
Voltaje de descarga (V)	100	1000	50×10^3
Corriente de descarga (A)	1×10^{-3}	0.5	20
Densidad electrónica (elec.-m ³)	1×10^{15}	5×10^{15}	6×10^{18}
Temperatura electrónica (eV)	0.8	2	10
Nivel de Potencia (W)	1×10^{-11}	200	25×10^4
Volumen del plasma (L)	1×10^{-5}	0.1	100

Tabla 1.2. Parámetros característicos de las descargas luminiscentes [2]



2. FUENTE DE ALTO VOLTAJE PARA LA GENERACIÓN DE ARCOS ELÉCTRICOS

2.1 CONCEPTUALIZACIÓN

Con el fin de facilitar la comprensión del proyecto al lector, se plantea seguidamente una breve explicación de los aspectos más importantes.

Voltaje (V): Se puede definir voltaje, tensión o diferencia de potencial, como la presión que ejerce una fuente de suministro de energía eléctrica o fuerza electromotriz (FEM) sobre las cargas eléctricas o electrones en un circuito eléctrico cerrado, para que se establezca el flujo de una corriente eléctrica. En otras palabras, el voltaje es el impulso que necesita una carga eléctrica para que pueda fluir por el conductor de un circuito eléctrico cerrado.

Alto Voltaje: Se considera alto voltaje a los valores de energía superiores a los 600 voltios.

Fuente de Voltaje: Es un dispositivo que nos brinda una tensión de salida necesaria para hacer funcionar la mayoría de circuitos eléctricos y electrónicos. La tarea de la *fuentes* o *fuentes de alimentación* de cualquier equipo o aparato electrónico es obtener el o los niveles adecuados de corriente a partir del voltaje de línea de 120 Vrms.

Algunos ejemplos de dispositivos que normalmente se conocen como fuentes de energía son: Pilas, baterías, dinamos, celdas solares, adaptadores, generadores de AC, etc. Las fuentes más usadas para obtener arcos eléctricos de alto voltaje (Ver figura No 2.1: Esquema de una fuente tradicional para generar arcos eléctricos a través de un tubo), están constituidas comúnmente por transformadores elevadores de gran tamaño y peso, circuitos elevadores y rectificadores, y bancos de capacitores. Debido a estos elementos, estas fuentes resultan ser voluminosas, no portátiles y se requiere de gran cuidado y



precauciones para su manejo. Por otra parte, estas fuentes no presentan lazos de retroalimentación ni amplificador de error, lo que no permite auto ajustarse para corregir el voltaje de salida a un nivel deseado.

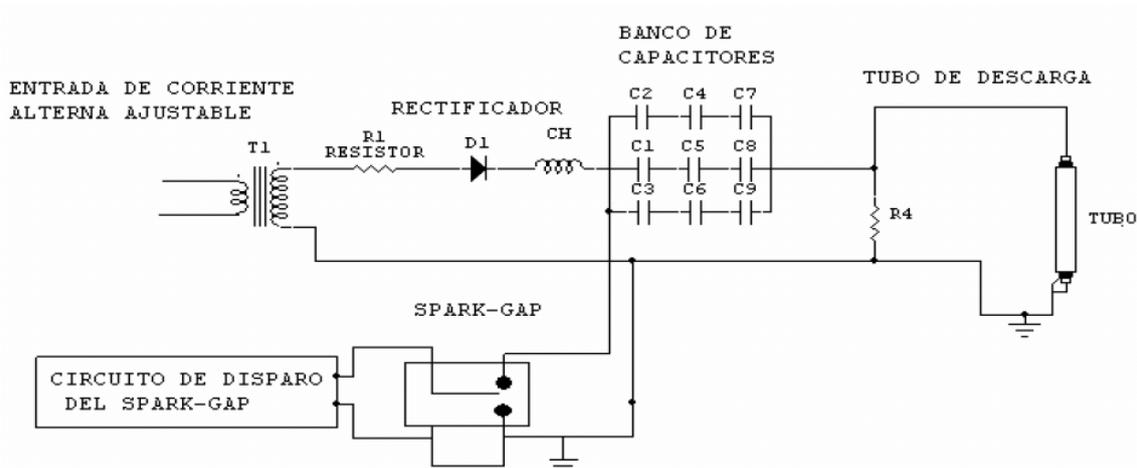


Fig. 2.1. Esquema de una fuente tradicional para generar arcos eléctricos a través de un tubo.[4]

Generación de Arco Eléctrico: Una forma para crear un arco es poniendo en contacto los extremos de dos electrodos en forma de lápiz, por lo general de carbono, y se hace pasar una corriente intensa (unos 10 amperios) a través de ellos. Esta corriente provoca un gran calentamiento en el punto de contacto, y si a continuación se separan los electrodos, se forma entre ellos un arco similar a una llama. La descarga está producida por electrones que van desde el electrodo negativo al positivo, pero también, en parte, por iones positivos que se mueven en sentido opuesto. El impacto de los iones genera un intenso calor en los electrodos, pero el positivo se calienta más debido a que los electrones que golpean contra él tienen mayor energía total. En un arco abierto al aire a presión normal el electrodo positivo alcanza una temperatura de 3.500 °C.

El intenso calor generado por el arco eléctrico suele utilizarse en hornos especiales para fundir materiales refractarios. En este tipo de hornos pueden alcanzarse fácilmente temperaturas del orden de los 2.800 °C. Los arcos también se utilizan como fuente de iluminación de alta intensidad. [14].



2.2 GENERALIDADES DE LA INGENIERIA CONCEPTUAL DEL PROCESO DE GENERACION DEL PLASMA MEDIANTE ARCOS ELECTRICOS PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS. [2].

El diseño de la fuente para la generación de arcos eléctricos es una parte del diseño preliminar del reactor de plasma y el sistema de tratamiento mostrado en la figura 2.2, que constituye el proyecto de investigación denominado *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA UTILIZACIÓN DEL PLASMA COMO HERRAMIENTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS*, perteneciente al grupo de investigación en Instrumentación Aplicada de la Universidad Pontificia Bolivariana, del cual se realiza a continuación una breve ilustración.

El objetivo básico de este proceso de experimentación es lograr la obtención de un tipo de plasma, mediante la generación y manipulación del arco eléctrico, para poder experimentar su efecto sobre diferentes tipos de residuos, lo cual permitirá constatar algunas teorías del plasma y direccionará el proyecto sobre la clase de residuo a trabajar y otras aplicaciones prácticas que se puedan derivar de los resultados obtenidos, permitiendo una evaluación más objetiva de la factibilidad de su uso.

En la figura 2.2 se presenta un diseño preliminar del reactor y el sistema de tratamiento de residuos basado en el proceso de experimentación, el análisis de la información y en las experiencias compartidas por los profesionales de la región que han trabajado con plasma.

Para este planteamiento no se tuvo en cuenta la capacidad del reactor en cuanto a la cantidad de residuos a tratar, simplemente se establece la ingeniería conceptual y básica del sistema de tratamiento.

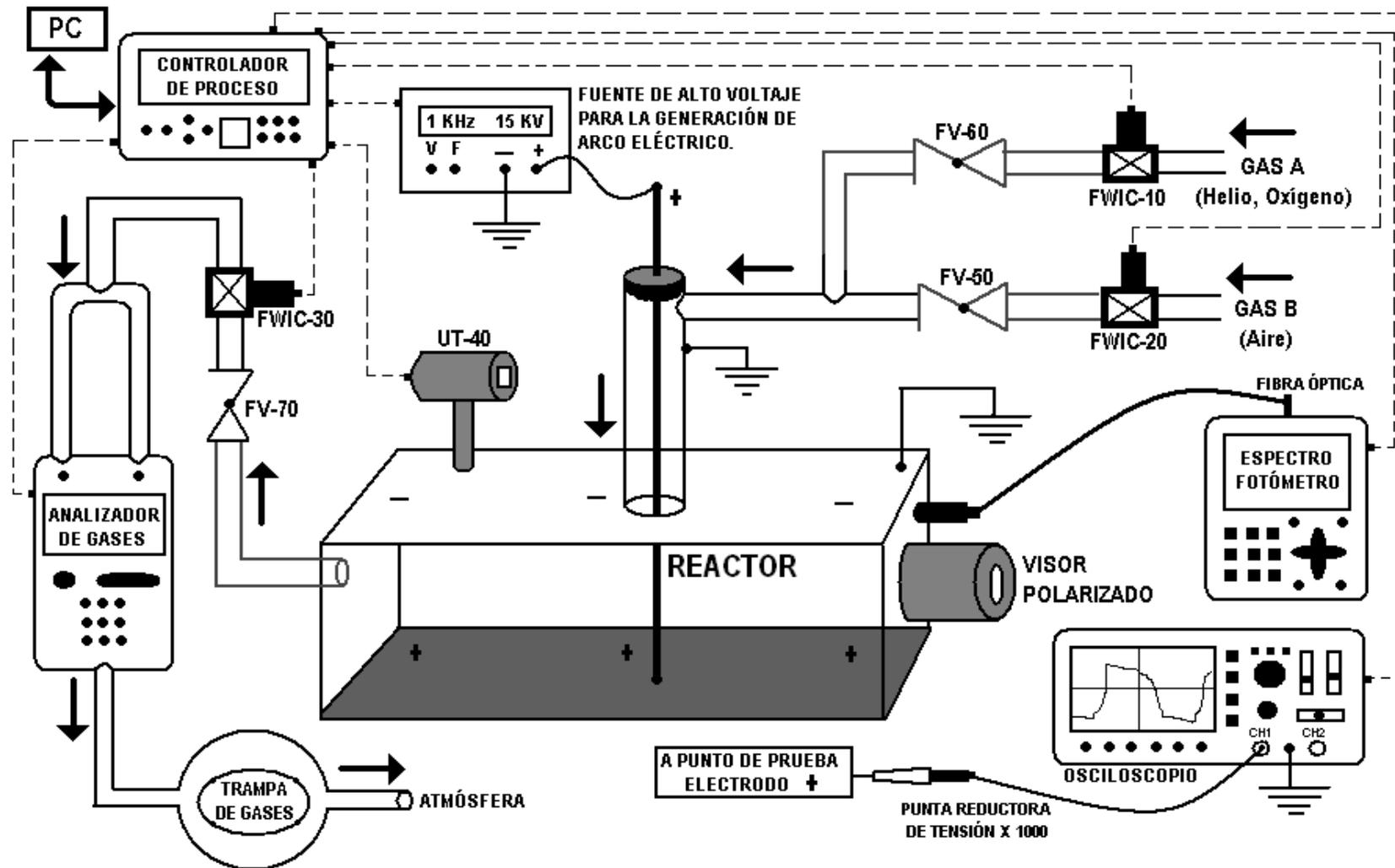


Fig. 2.2. Diseño preliminar del reactor y sistema de tratamiento de residuos.

Fuente: Quintero C.S., González C.P., Mantilla J.C. Septiembre de 2007.



Inicialmente se considera la utilización de gases, además del aire, como el Helio y el Oxígeno mezclados en porcentajes máxicos. Los instrumentos que conforman el sistema propuesto de acuerdo a la simbología estándar establecida por la ISA (Sociedad de Instrumentos de América) son:

- FWIC: Controlador Indicador de Flujo Másico.
- FV: Válvula de Flujo tipo Check (Rectificadora).
- UT: Transmisor Multivariable (Presión y Temperatura).
- Fuente de Alto Voltaje para la generación de arco eléctrico.
- Analizador de Gases.
- Espectrofotómetro.
- Osciloscopio con Punta de Alto Potencial x 1000.
- Controlador de Procesos Multilazo.
- PC: Computador Central (Sistema Supervisorio)

El diseño básicamente consiste en introducir al sistema 2 o más gases mezclados en porcentajes máxicos, mediante los FWIC-10 y FWIC-20, y las válvulas check FV-50 y FV-60 que impiden la contaminación de las fuentes de gases por desequilibrios de presión en el sistema. En el REACTOR se tiene un electrodo central llamado “+” que incluye el piso del contenedor, siendo este de material conductor; y la carcasa externa del reactor y tapa superior del contenedor son llamados “-”, también de material de naturaleza conductora que conforman la tierra física del sistema. Mediante la utilización de una fuente de alto voltaje (entre 10KV y 30KV) se generará un arco eléctrico en el reactor (entre los materiales que sirven como electrodos + y -) que tiene como propósito ionizar la mezcla de gases, generando el plasma y manteniéndolo en el contenedor para que actúe sobre el residuo residente, produciendo su descomposición. Vale la pena aclarar que los materiales conductores + y – se encuentran aislados en el sistema por un material no conductor (teflón, p.e.). Dentro del contenedor se plantea un UT que tiene como propósito transmitir al controlador de proceso la presión y temperatura del



sistema, controlándolas con los flujos máxicos de los gases y la intensidad del arco eléctrico. El contenedor posee un visor polarizado que permite ver de manera segura y externamente la reacción. Adicionalmente se propone la utilización de un espectrofotómetro y un osciloscopio que permitan medir de mejor manera las características del plasma en interacción con los residuos en el reactor/contenedor.

Conforme la mezcla de gases ionizados fluyen a través del reactor, y bajo unas condiciones de presión establecidas, esta sale a través de la válvula check FV-70 que impide el regreso de la mezcla de gases al contenedor, mezcla que al salir ya no esta sometida al arco eléctrico y por tanto vuelve a su estado natural, y cuyo caudal es controlado por el FWIC-30 que básicamente es el principal responsable del control de la presión en el reactor.

Esta mezcla saliente es procesada por un analizador de gases que verifica el porcentaje de los gases originalmente mezclados, junto a otro tipo de gases que pudiesen haberse generado en la reacción del plasma con los residuos. Luego del análisis de gases, esta mezcla se pasa por una trampa de gases para retenerlos y confinarlos, excepto el aire, de tal manera que no sean arrojados a la atmósfera, evitando otro tipo de contaminación.

El sistema propone un control centralizado que manipule los controladores indicadores de flujo máxico, la fuente de alto voltaje para la generación de arco eléctrico, el analizador de gases, el transmisor multivariable, el espectrofotómetro y el osciloscopio, teniendo como objetivo controlar las condiciones de presión y temperatura en el reactor, y en general, las características del plasma.

Esta ingeniería conceptual y básica propone una estructura general del reactor y sistema de tratamiento.



2.3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPOS

En esta parte se realiza las pruebas de las fuentes de voltaje implementadas para obtener el voltaje y la corriente del circuito de potencia de 17VDC y 10A, con el voltaje y la corriente del circuito de control de 12VDC y 500 mA, respectivamente; el circuito de potencia esta basado inicialmente en una bobina elevadora de tensión de automóvil y un interruptor de potencia de estado sólido, IRF 840; el circuito básico de control esta constituido principalmente por un LM 555 que controla la frecuencia de operación entre 50Hz y 500Hz. Estos circuitos se implementaron con base al circuito de swicheo y potencia de una cerca eléctrica (ver figura 2.3) [18], su selección se dio por el funcionamiento elemental del circuito que genera un arco eléctrico, con el inconveniente de la baja intensidad y frecuencia del arco eléctrico, sumado al poco tiempo de generación del arco. Debido a este resultado se realizo una serie de pruebas con diferentes tipos de fuentes de alimentación, para obtener la energía necesaria requerida en la generación del arco eléctrico constante con mayor intensidad y un tiempo prolongado.

El circuito de control y potencia se encuentran acoplados entre ellos y además se realizo modificaciones en la parte de potencia, puesto que el circuito inicial tiene un transistor que solo trabaja a bajas frecuencias de activación, por tanto se implemento un IRF-840 (ver figura 2.4), este circuito ya modificado se puso en funcionamiento con cada fuente de prueba implementada para lograr inferir sobre la fuente de alimentación más conveniente, que garantice el suministro de energía en la obtención del arco eléctrico.

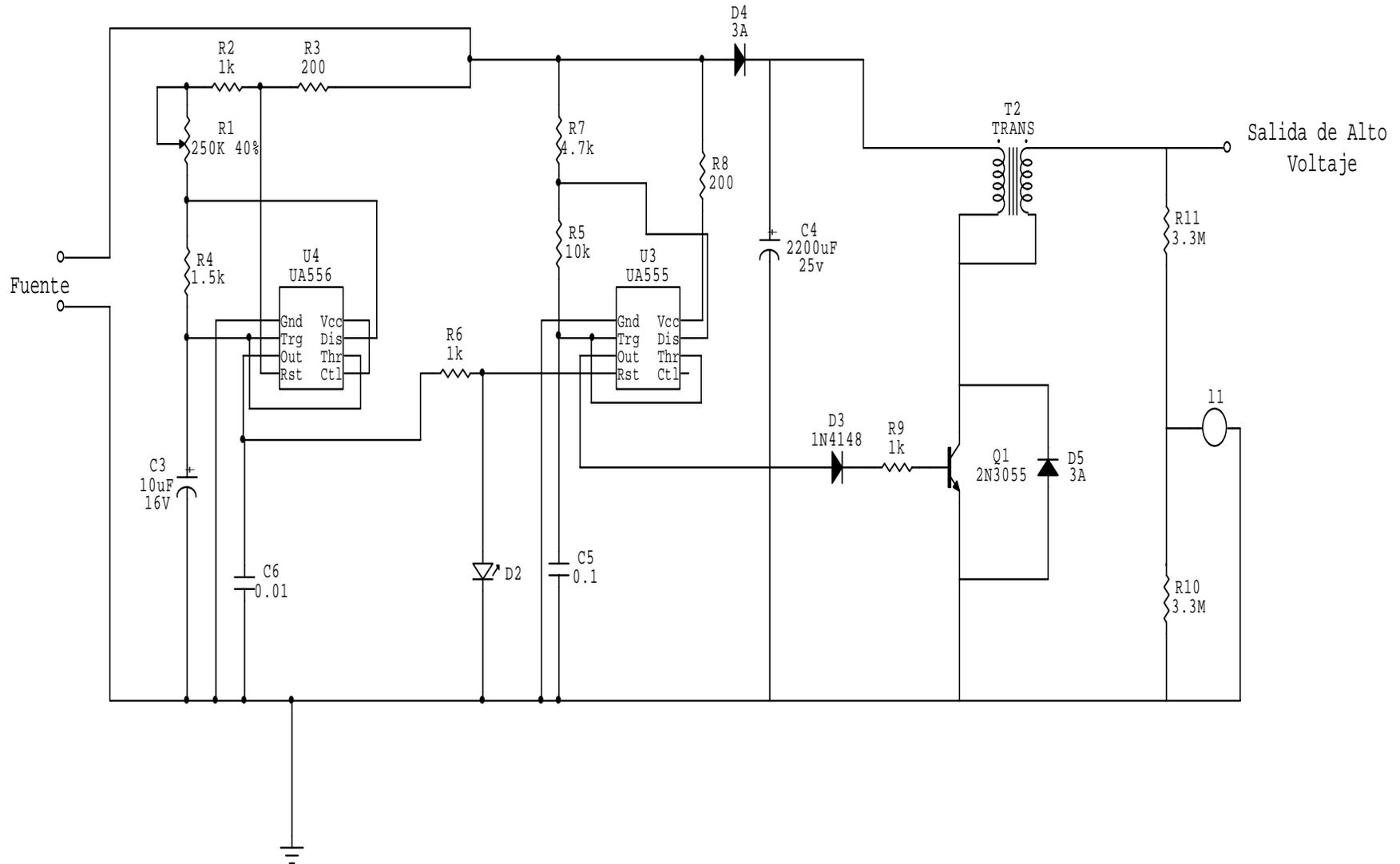


Fig. 2.3. Circuito inicial de control y potencia. Fuente: Autor

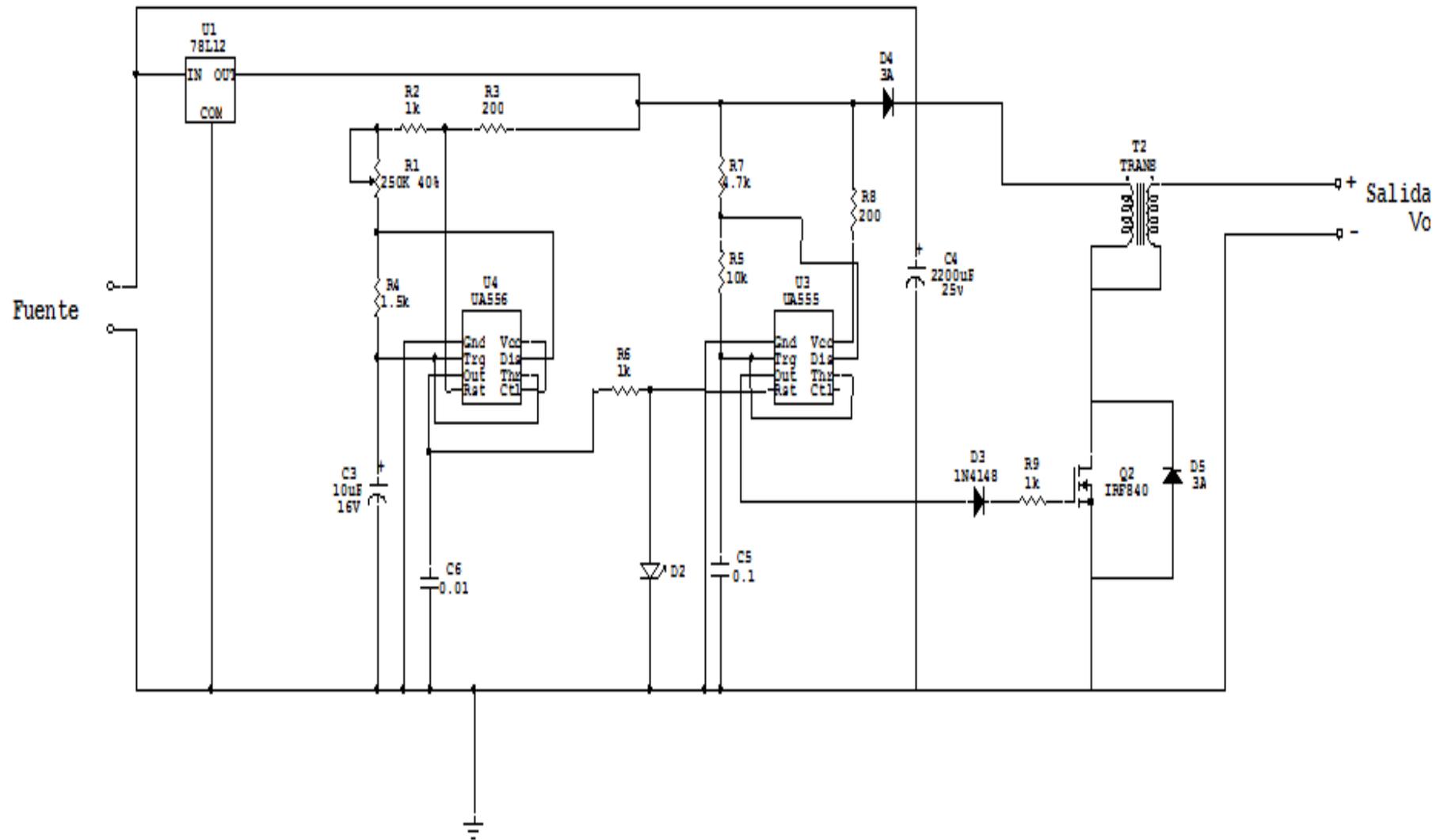


Fig. 2.4. Circuito modificado de control y potencia. Fuente: Autor



El circuito de control se encuentra constituido por un circuito integrado LM 556, que internamente esta formado por dos 555, cada mitad del LM 556 esta conectado por un circuito oscilador o multivibrador astable, el oscilador produce pulsos de muy baja frecuencia, con el que se obtiene una señal cuadrada de pulsos positivos, la cual es la frecuencia de activación (ver figura 2.5), luego esta señal pasa al LM 555, el segundo oscilador, trabaja con una frecuencia mucho más alta, más o menos a 700Hz el cual genera la frecuencia de conmutación en el tiempo de encendido (Ton) de la señal antes mencionada, generando dentro de este ciclo de señal, otra señal cuadrada, esta se puede observar en la figura 2.6.

La señal de salida del primer oscilador se utiliza para variar la frecuencia del segundo oscilador, mediante el potenciómetro R_1 ; esta señal obtenida se encarga de realizar la conmutación del IRF-840.

La configuración del los circuitos integrados LM 556 y LM 555, se realiza para mantener el buen funcionamiento del transformador elevador de alto voltaje, y garantizar un buen porcentaje de tiempo de apagado (Toff) de la señal de conmutación, para evitar daños en el transformador elevador, debido al ciclo de trabajo.

Como se puede observar en figura 2.7, la señal que realiza la conmutación, es solo una fracción de la señal inicial, lo que corresponde a un tiempo de encendido mas pequeño, la señal cuenta con esta característica para hacer que el transformador descanse en el tiempo muerto de la señal y no se produzca un corto circuito en el transformador cuando se conmuta con frecuencias bajas. Otros elemento con el que cuenta este circuito es un potenciómetro que se encarga de variar la frecuencia de conmutación y un diodo de 3A en la entrada del transformador que esta encargado de evitar el ingreso de corrientes provenientes del transformador, puesto que estas corrientes dañaban el LM 555, cuando no se contaba con este elemento.

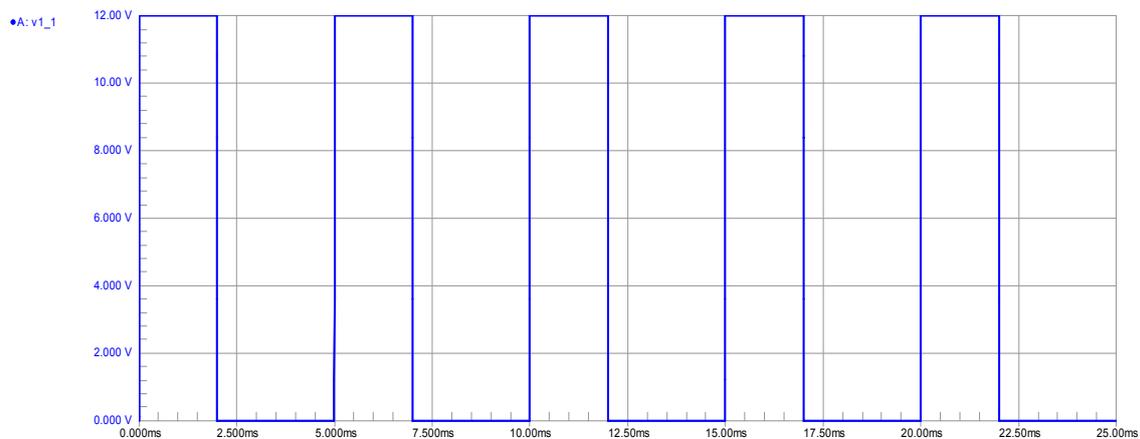


Fig. 2.5. Señal de salida del circuito de control. Fuente: Autor

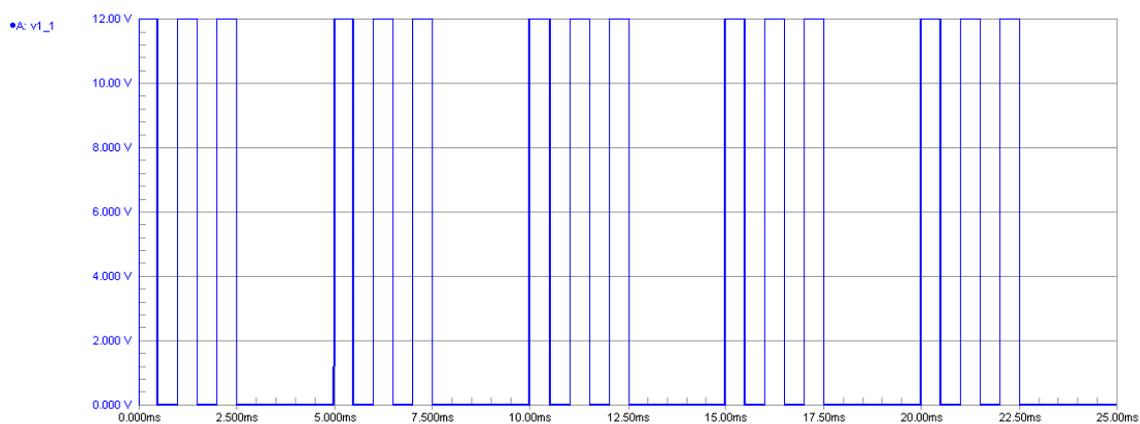


Fig. 2.6. Señal de salida del circuito de control. Fuente: Autor

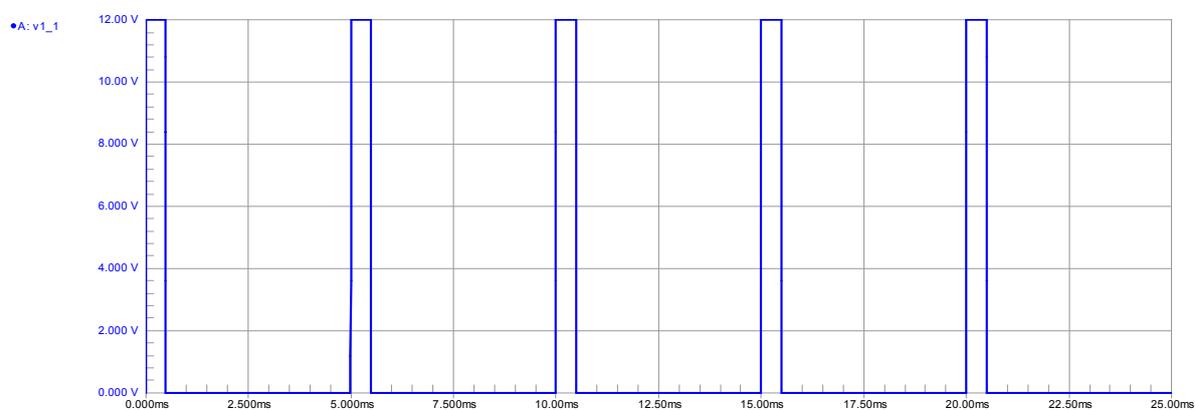


Fig. 2.7. Señal de salida del circuito de control. Fuente: Autor



El circuito de control se implemento para comprobar experimentalmente la obtencion de las señales anteriormente mostradas.

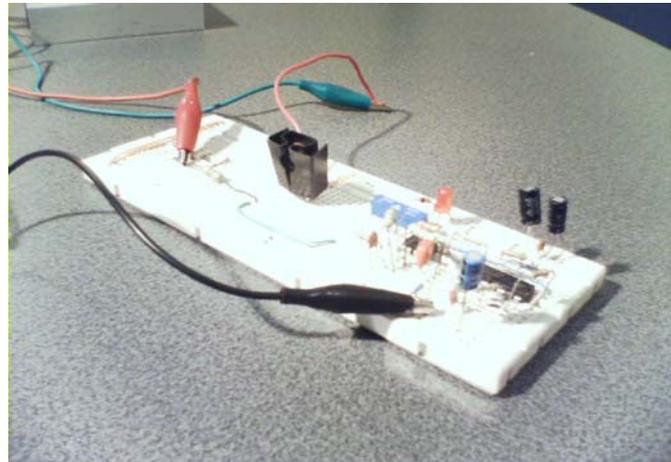


Fig. 2.8. Fotografía del circuito de control. Fuente: Autor

El circuito de potencia se encarga de elevar el voltaje a mas de 600V, y cuenta con un transformador elevador de voltaje, que aumentar el voltaje suministrado por la fuente a mas de 1KV, tambien cuenta con un dispositivo de conmutación IRF840, que ayuda al paso de la corriente que requiere el transformador, y un disipador de calor acoplado al IRF-840.

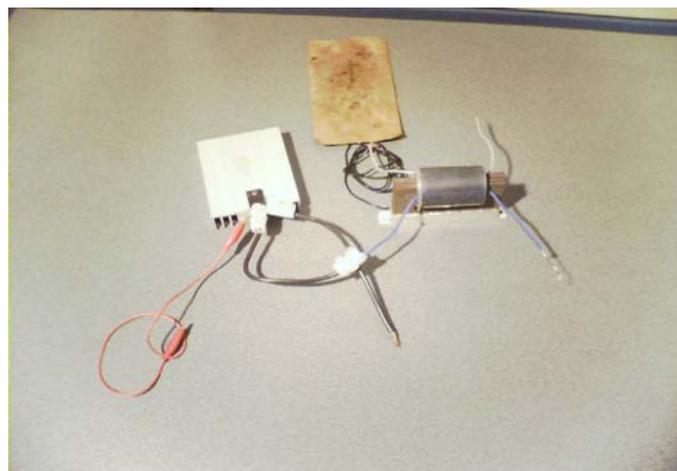


Fig. 2.9. Fotografía del circuito de potencia. Fuente: Autor



Las fuentes simuladas y usadas para alimentar el circuito de control y los dispositivos de potencia son:

- Fuente Switching
- Fuente PROTEK 3003B
- Fuente Regulada de Voltaje Basada en el LM317

2.3.1 Fuente Switching

Este prototipo de fuente se simulo e implemento para afrontar los resultados prácticos y teóricos obtenidos con su utilización, esta tiene unos parámetros de voltaje de salida de 12V y una corriente de 2,5A.

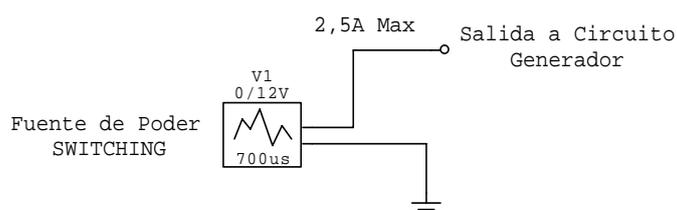


Fig 2.10. Diagrama de la fuente switching Fuente: Autor

Resultado de la Simulación: Esta fuente como lo indica la primera simulación sin el circuito de control y potencia, que se observa en las figura 2.12, 2.13, tiene la corriente y voltaje requerido para la prueba de esta. En el acoplamiento de la fuente con el circuito de control (figura 2.14) y potencia para lograr la generación de arcos eléctricos, se observo una caída de voltaje después de 0,3 ms (milisegundos) de iniciar la simulación como se puede ver en la figura 2.15.

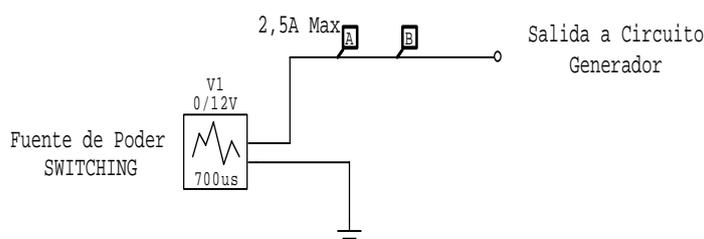


Fig. 2.11. Diagrama de la fuente switching. Fuente: Autor

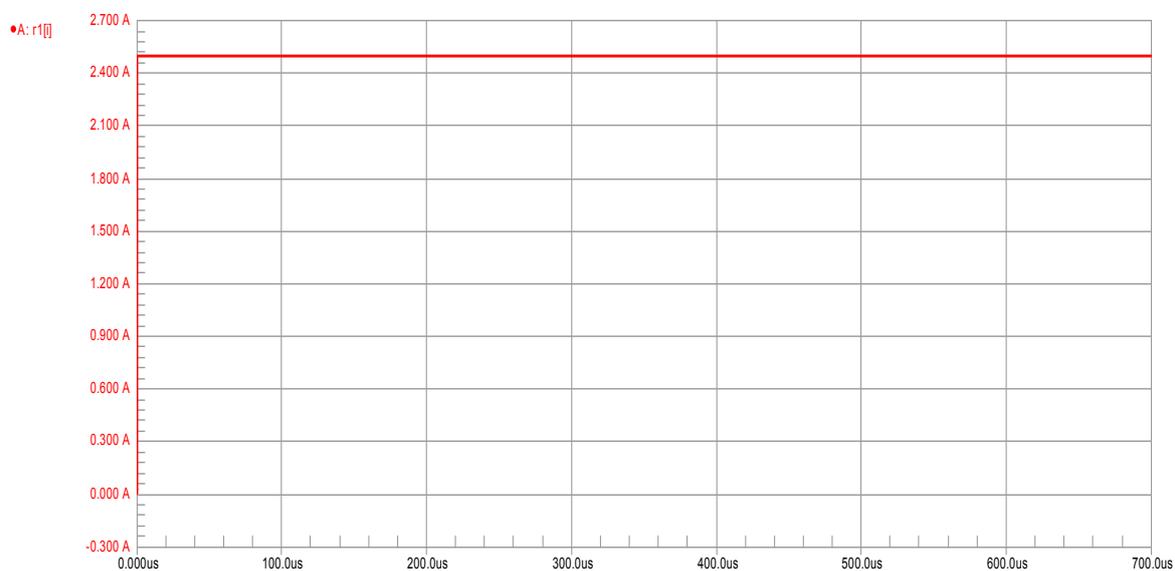


Fig. 2.12. Señal de la corriente de salida de la fuente switching. Fuente: Autor

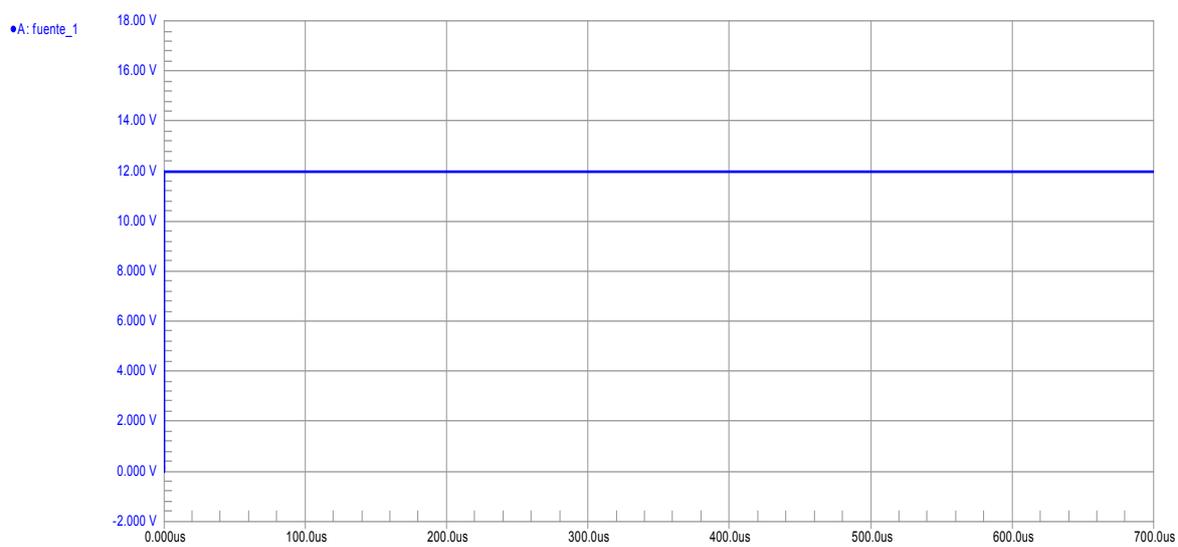
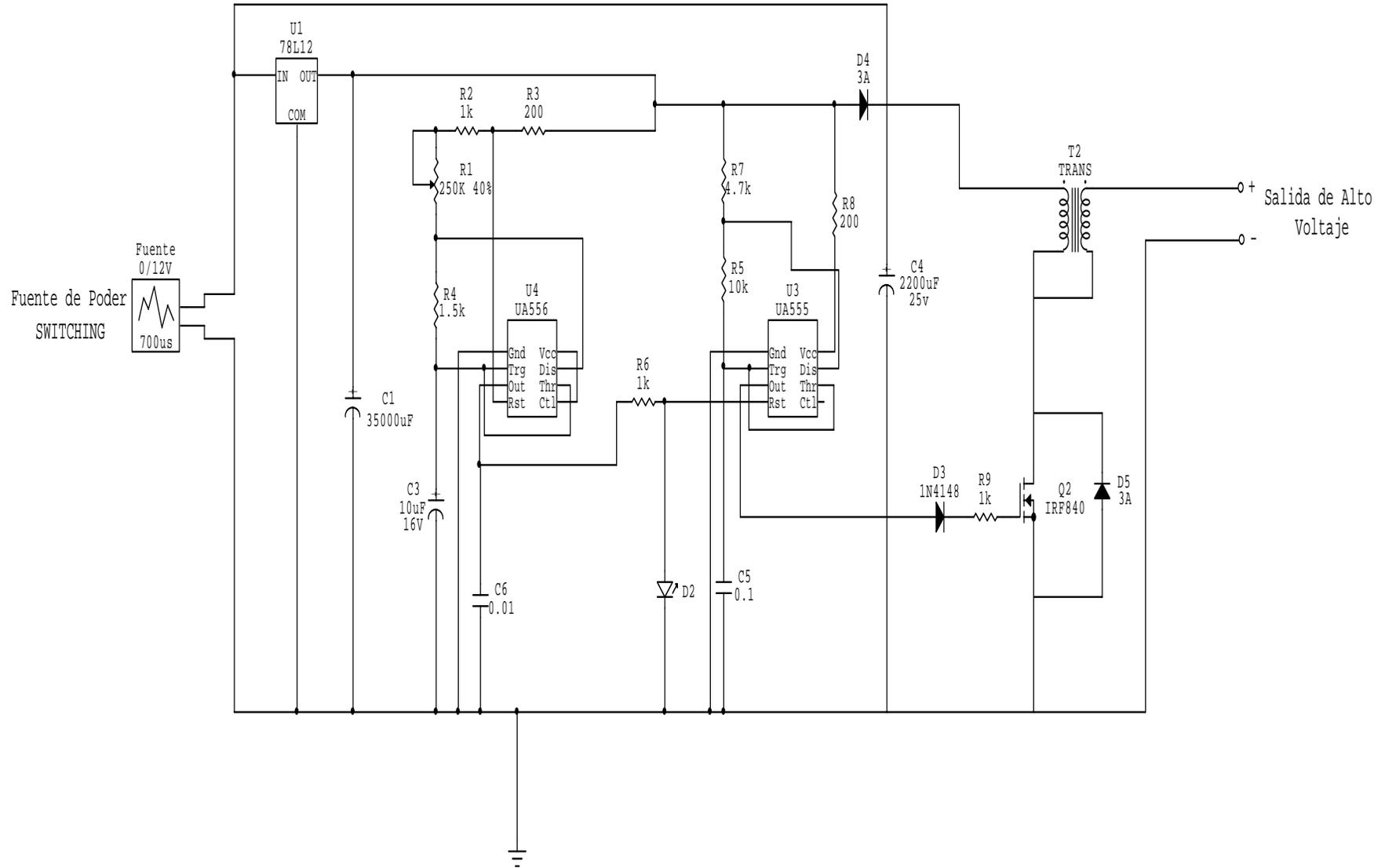


Fig. 2.13. Señal del voltaje de salida de la fuente switching. Fuente: Autor



2.14. Fuente switching conectada al circuito generador con carga. Fuente: Autor

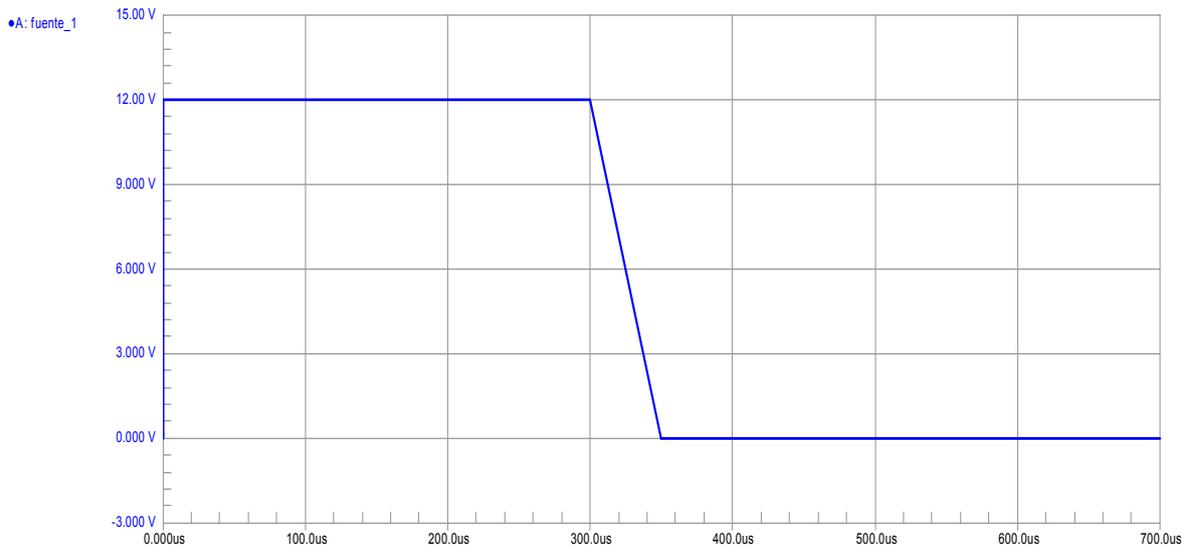


Fig. 2.15. Señal de salida de la fuente switching con carga. Fuente: Autor

Resultado Experimental: Inicialmente esta suministra correctamente 12V y 2,5A sin presentar algún inconveniente en la energía, acoplado a la fuente el circuito de control y potencia para su respectiva prueba de funcionamiento, se pudo observar tan solo un pequeño arco eléctrico que presento una duración de tan solo una fracción de segundo con una intensidad lumínica tenue, y la suspensión del suministro de energía inmediato de la fuente, debido a que esta se dispara en el momento que el circuito empieza a pedir una mayor energía para generar el arco eléctrico.

Análisis de la Fuente: generar arcos eléctricos con esta fuente resulta inconveniente, puesto que esta no tiene la capacidad de proporcionar la energía suficiente para lograr este fenómeno por un prolongado tiempo, ya que en el momento en el cual empezaba a generarse el arco, la fuente dejo de funcionar porque no estaba en la capacidad de proveer la energía indispensable que se requería para el arco eléctrico, debido a las características de diseño de la fuente.



2.3.2 Fuente Regulada de Voltaje Protek 3003B

Es una fuente reguladora de tensión de 0 a 30 VDC con salida de corriente de 0 a 3A, con indicador digital; esta se implemento por tener las características de voltaje en el valor requerido de 12 VDC y la corriente mayor a 2,5A. En esta al igual que la fuente Switching se simulo e implemento para afrontar los resultados prácticos y teóricos obtenidos con su utilización.

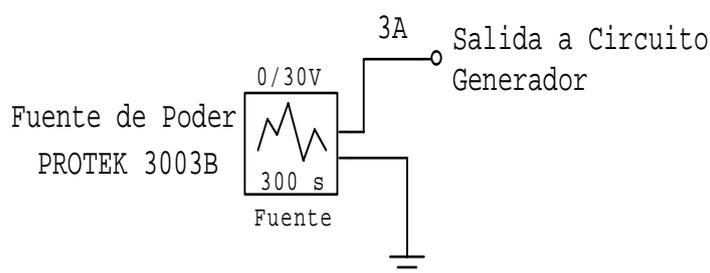


Fig. 2.16. Diagrama de la fuente Protek 3003B. Fuente: Autor

Resultado de la Simulación: En la simulación sin el circuito de control y potencia, que se observa en la figura 2.18 y 2.19, suministra la corriente y el voltaje que indica los parámetros de la fuente para la prueba de esta. En el momento de articular la fuente con el circuito de control y potencia (figura 2.20) para la creación del arco eléctrico, se observo una caída de voltaje después de 0,3 ms de iniciar la simulación como se puede observar en la figura 2.21.

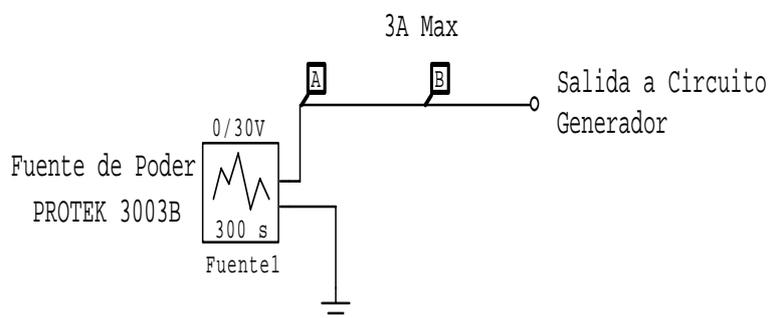


Fig. 2.17. Diagrama de la fuente PROTEK 3003B. Fuente: Autor

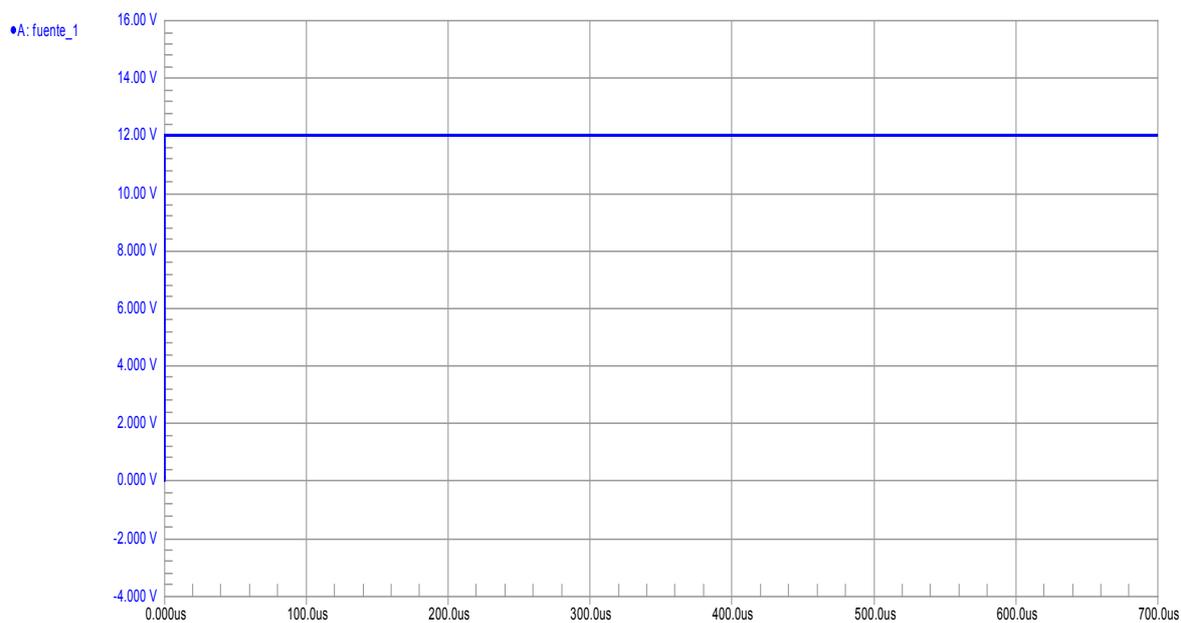


Fig. 2.18. Señal del voltaje de salida de la fuente PROTEK 3003B. Fuente: Autor

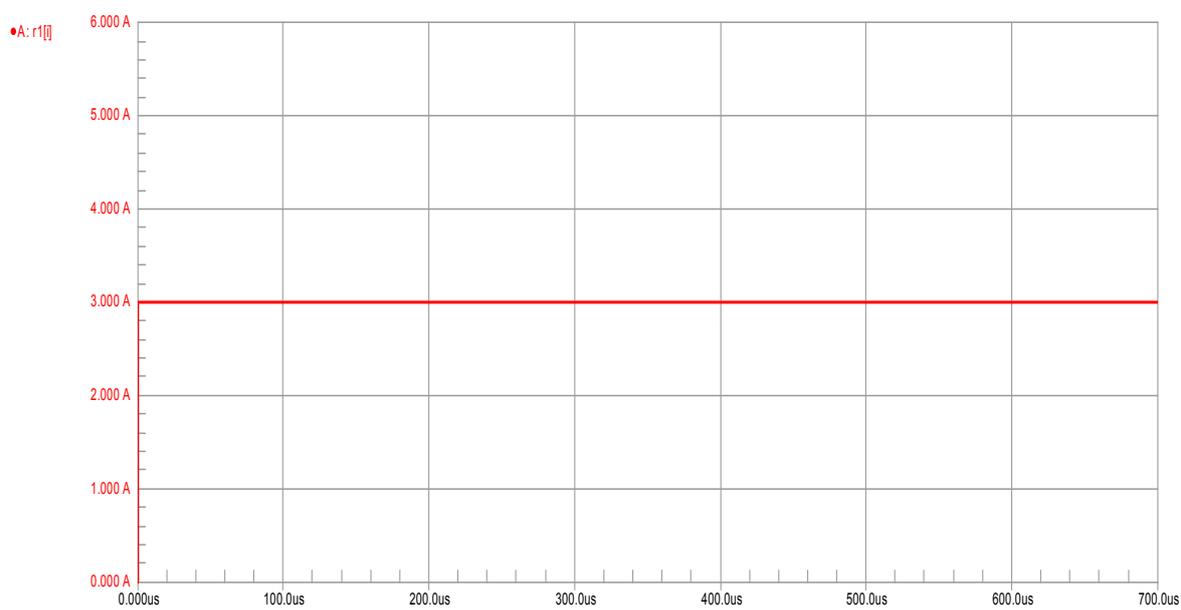


Fig. 2.19. Señal de la corriente de salida de la fuente PROTEK 3003B. Fuente: Autor

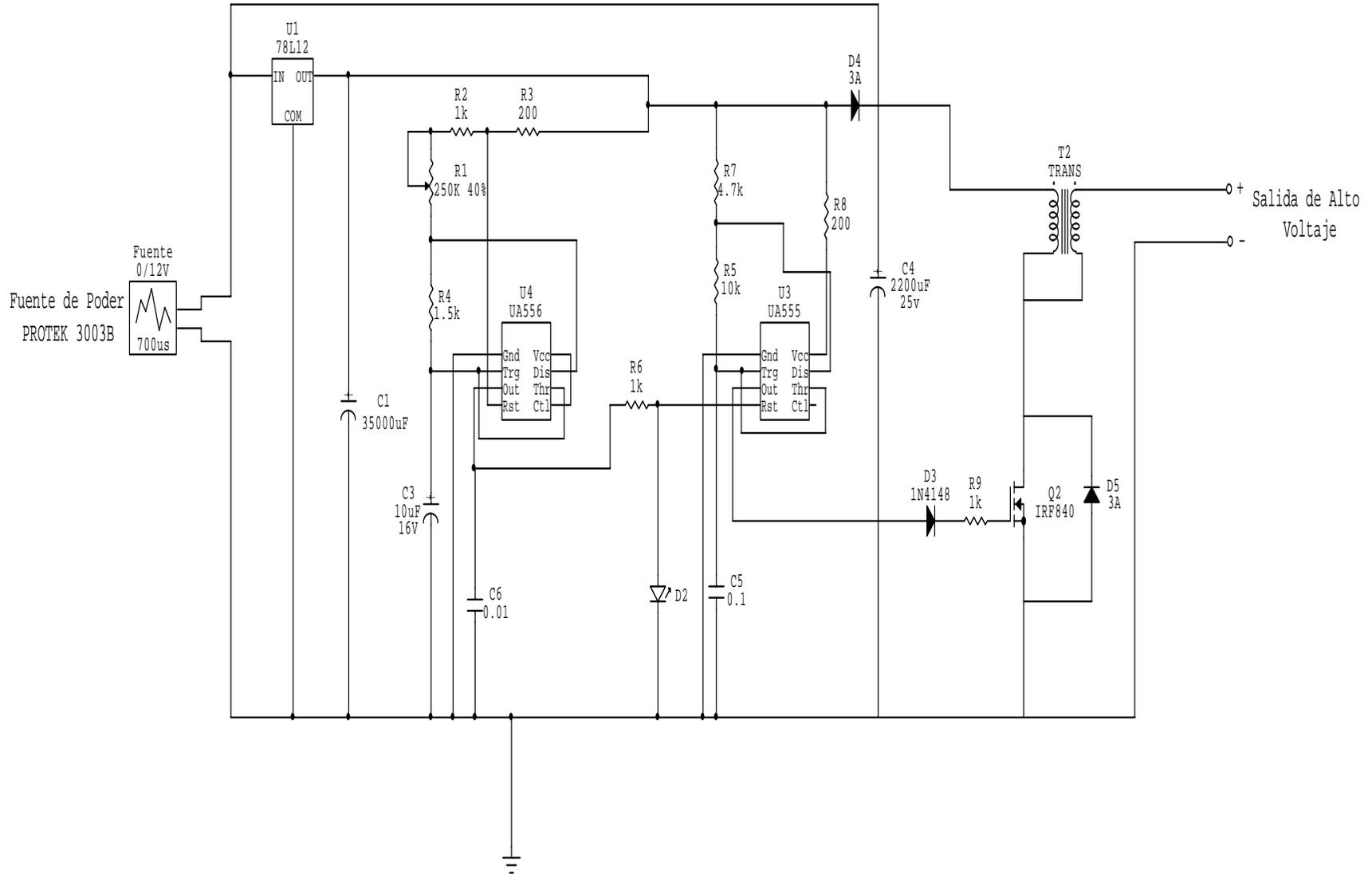


Fig. 2.20. Fuente PROTEK 3003B conectada al circuito generador (con carga). Fuente: Autor

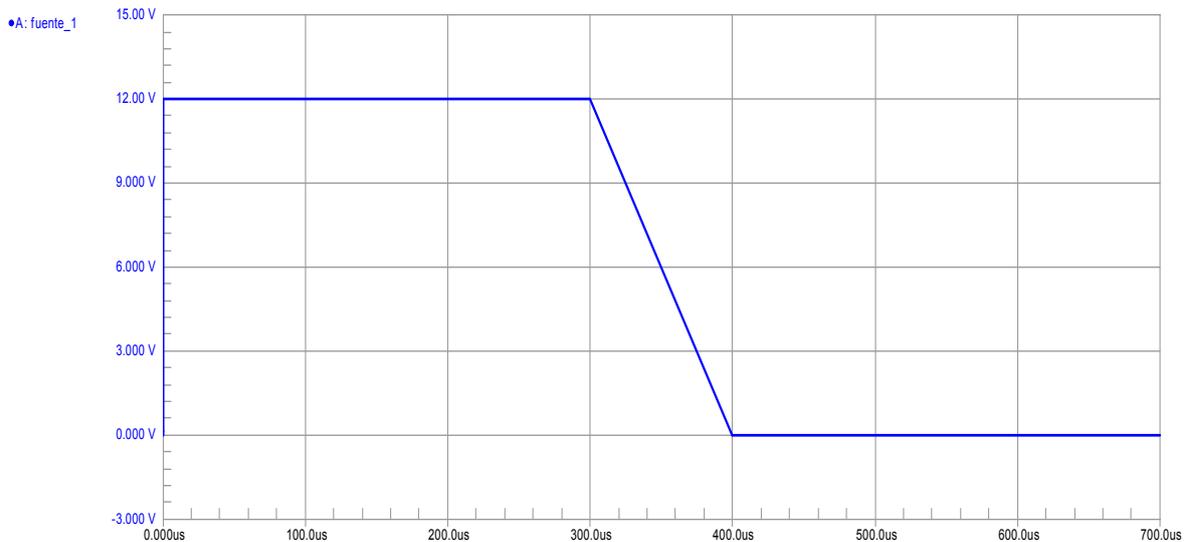


Fig. 2.21. Señal de salida de la fuente PROTEK 3003B con carga. Fuente: Autor

Resultado Experimental: La fuente en funcionamiento sin carga, suministra claramente los 12V y la corriente máxima de 3A sin inconveniente en la energía; al realizar la conexión de esta con el circuito de control y potencia para la prueba de funcionamiento, se observó de forma similar a la primera fuente un pequeño arco eléctrico con una proporción mayor de intensidad del arco pero igualmente insuficiente, que también duró muy poco tiempo. La fuente al producirse el fenómeno dejó de funcionar quemándose el fusible de esta, lo que indicaba que el circuito de potencia requería de una energía mayor a la estimada para crear el arco eléctrico.

Análisis de la Fuente: Al igual que la primera fuente, este resultado resultó infructuoso al querer lograr los arcos eléctricos, por que no proporciona la energía requerida para alimentar el circuito de potencia. Al no tener certeza de la potencia experimental que requería el circuito para su funcionamiento, se realizó una valoración de esta, obteniendo como resultado una corriente aproximada de 5A a 12 VDC; de acuerdo a esto, se procedió a realizar el diseño y la implementación de una fuente de alimentación que cumpliera con estas características.



2.3.3 Fuente Regulada de Voltaje Basada en el LM317

Se diseño con los parámetros de voltaje y corriente de 12 VDC y 5A respectivamente, la fuente tiene una protección de corto circuito que deja de suministrar energía en el momento que ocurra un corto entre la salida de la fuente y tierra, además el integrado LM317 (ver anexo A), indica esta situación mediante un calentamiento en su carcasa, haciendo la fuente muy confiable por sus característica de protección y el suministro de energía, por lo que es una buena opción de fuente de energía para experimentar en el proyecto.

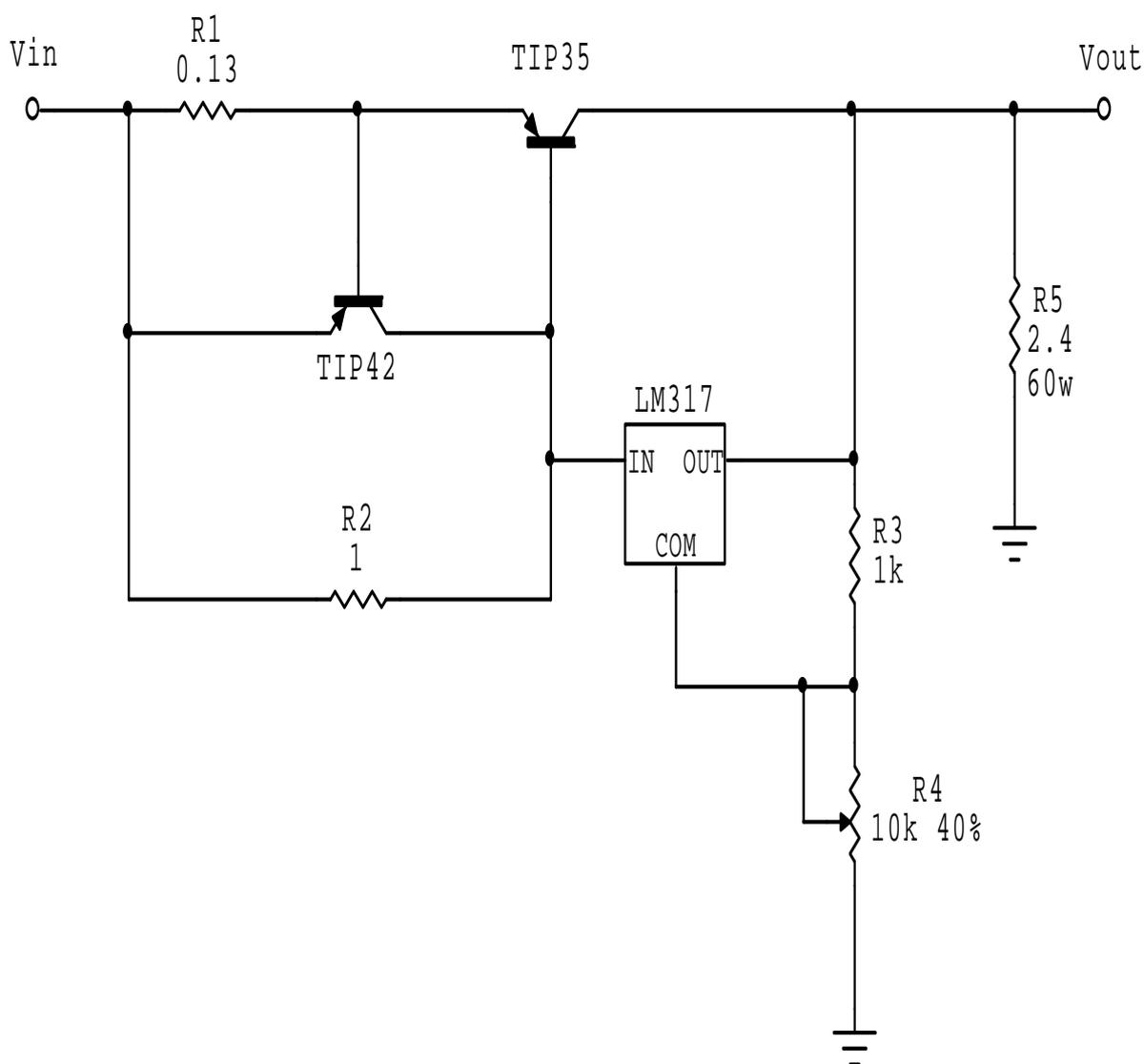


Fig. 2.22. Esquema de la fuente con LM317. Fuente: Autor



Parámetros de diseño:

$$V_1 = 0.65V$$

$$I_1 = 5A$$

$$V_{out} = 12V$$

$$I_2 = 1.3 A$$

Cálculos del diseño:

R_1 se determina mediante:

$$R_1 = V_1 / I_1 \quad (2.1)$$

$$R_1 = 0.65V / 5A$$

$$R_1 = 0.13\Omega$$

R_2 se determina mediante:

$$R_2 = V_2 / I_2 \quad (2.2)$$

V_2 se determina mediante:

$$V_2 = V_{BEQ1} + V_{BEQ2} \quad (2.3)$$

$$V_2 = 2V_{BEQ1}$$

$$V_2 = 1.3V$$

De la ecuación (2.2) tenemos:

$$R_2 = 1.3V / 1.3A$$

$$R_2 = 1 \Omega$$

La resistencia de carga R_L se determina con:

$$R_L = V_{out} / I_{out} \quad (2.4)$$

$$R_L = 12V / 5A$$

$$R_L = 2.4\Omega$$



La potencia de la resistencia de carga P_{RL} se determina con:

$$P_{RL} = I_{out} * V_{out} \quad (2.5)$$

$$P_{RL} = 5A * 12A$$

$$P_{RL} = 60 \text{ w}$$

Primero se calculo R_1 , esta resistencia es de potencia y se obtiene para garantizar la activación del TIP-42; luego se calculo R_2 , que mantiene activado el transistor de potencia TIP-35, los transistores de potencia son para que la fuente pueda suministrar la corriente del diseño. Las resistencias R_3 y R_4 son para el ajuste del voltaje de salida deseado de la fuente, por medio del LM317, que se encarga de mantener regulado el voltaje deseado en la salida de la fuente; a continuación se presenta los datos y cálculos necesarios para el diseño de la fuente con el circuito integrado LM317.

Resultado de la Simulación: Con la simulación de la fuente se pretende comprobar el correcto funcionamiento de la misma y verificar si el diseño cumple los parámetros establecidos de voltaje y corriente, en la figuras 2.24, 2.25, se observa que el diseño cumple las características establecidas sin el circuito de control y potencia, a la hora de acoplar este circuito y verificar que la fuente puede cumplir con el objetivo de generar arcos eléctricos, se observa en la señal de la figura 2.27 que el voltaje se cae con menor rapidez que las anteriores fuentes, pero con igual comportamiento.

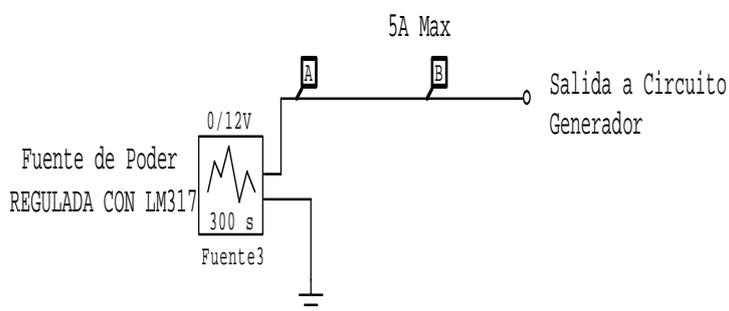


Fig. 2.23. Diagrama de la fuente con LM317. Fuente: Autor

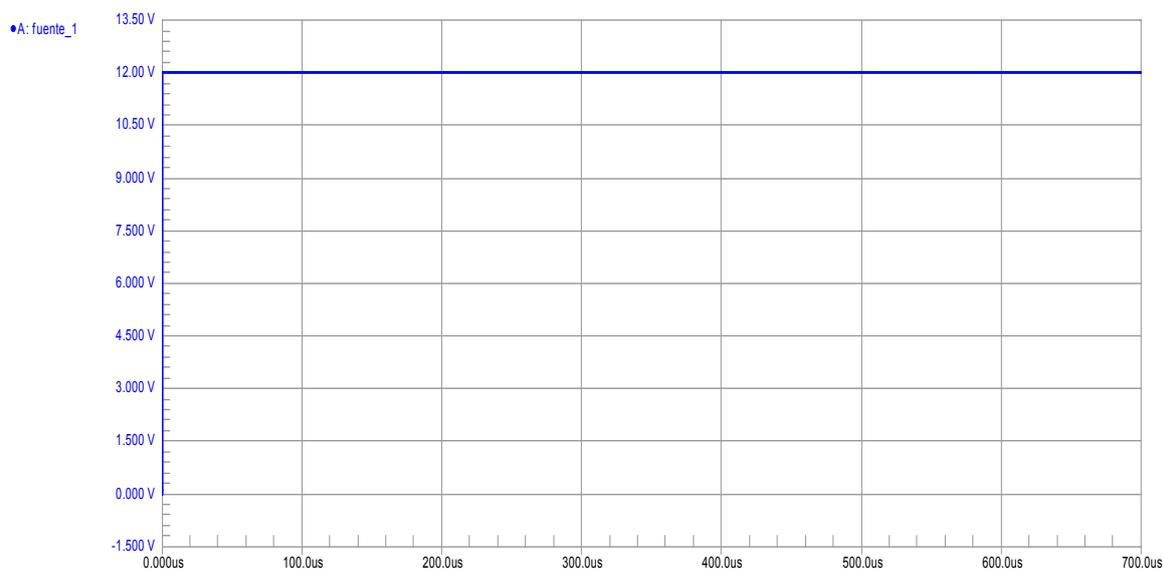


Fig. 2.24. Señal del voltaje de salida de la fuente con LM317. Fuente: Autor



Fig. 2.25. Señal de la corriente de salida de la fuente con LM317. Fuente: Autor

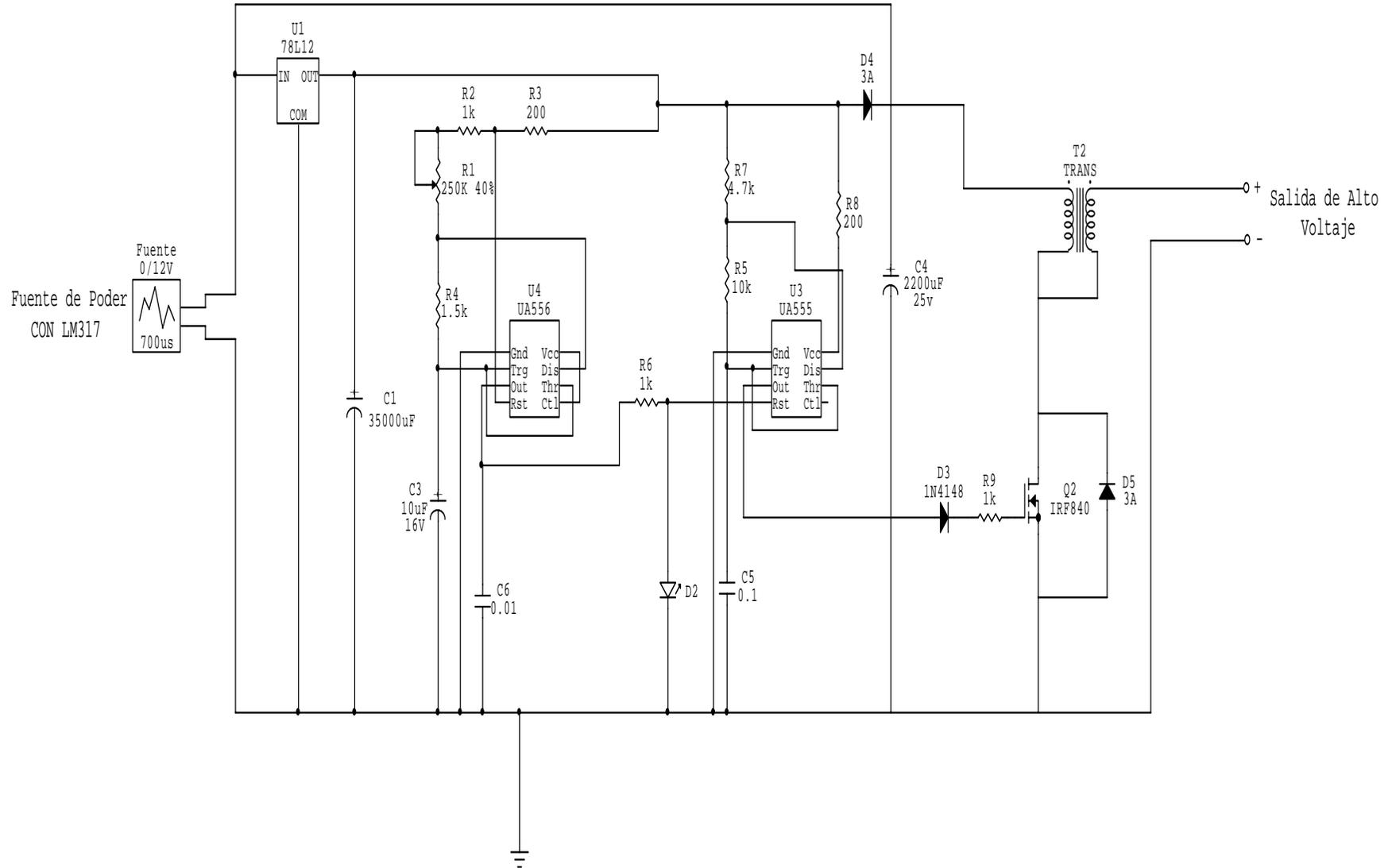


Fig. 2.26. Circuito de la fuente con LM317 (con carga). Fuente: Autor



Fig. 2.27. Señal de salida de la fuente con LM317 con carga. Fuente: Autor

Resultado Experimental: Inicialmente la fuente suministra los 12 VDC y 5A en la salida, pero al realizar el acople de esta con el circuito generador solo se obtuvo los arcos eléctricos con buena intensidad por corto tiempo y luego la fuente dejó de funcionar, porque el circuito pedía más corriente para seguir creando arcos eléctricos y debido a esto el integrado de la fuente se calentó y en consecuencia se ejecutó su característica de abrir el circuito para la protección del mismo evitando un eventual daño por corto circuito.

Análisis de la Fuente: Mediante la fuente se logró obtener el arco eléctrico deseado, con poco tiempo de funcionamiento, debido al sobrecalentamiento del LM317, lo que produce la desactivación del integrado y posterior interrupción de la operación de suministro de energía. Debido a lo anteriormente expuesto, se determinó que la fuente no tenía la capacidad de lograr la obtención del fenómeno pese a algunas modificaciones realizadas al circuito por lo tanto se prosiguió en la búsqueda del diseño, con la obtención del diseño final.



2.4 DISEÑO DE LA FUENTE DE ALTO VOLTAJE PARA LA GENERACIÓN DE ARCOS ELECTRICOS.

Después de realizar la simulación y experimentación de diferentes fuentes de alimentación, se logro inferir en el diseño de la fuente de alimentación para el circuito de potencia que requiere un voltaje de 17VDC con corriente máxima de 10A en el primario del transformador de alto voltaje y para el circuito de control 12 voltios DC regulados, con corriente de 500mA (miliamperios); la fuente debe suministrar la energía que se necesita para la generación del arco eléctrico en el secundario del transformador.

2.4.1 Descripción Básica de Componentes

Transformador reductor de voltaje TR6: 120 VAC en la entrada, con salida de secundario de 12VAC; El transformador es un dispositivo que se utiliza para elevar o reducir el voltaje, según como sea necesario.

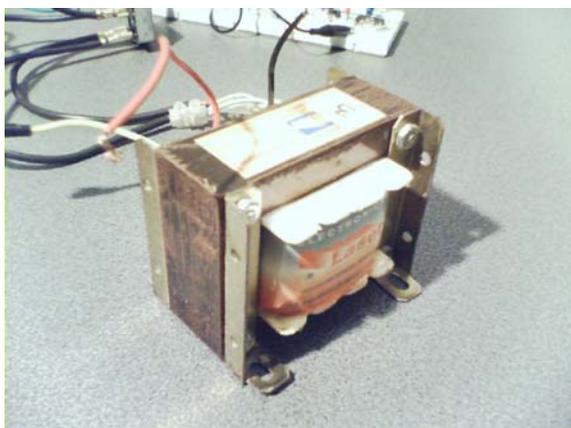


Fig. 2.28. Foto del transformador reductor TR6. Fuente: Autor

Transformador elevador de alto voltaje: Con entrada de 17VDC, debido al voltaje más alto que se obtiene de la rectificación de la señal de AC que proporciona el TR6.



Fig. 2.29. Foto del transformador elevador de alto voltaje. Fuente: Autor

El transformador que se observa en la figura 2.29, tiene un voltaje de salida de 1,5KV aproximadamente, de acuerdo a la relación de transformación del transformador, la cual se determino con la ecuación.

$$n = \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (2.6)$$

Cuyos valores se obtienen por la curva de voltaje vs frecuencia.

Por razones de prueba $V_2 = 2V$ y $V_1 = 23,3mV$ que se obtuvo por la grafica 2.30 en su rango de frecuencia estable.

De acuerdo a la ecuación (2.6) tenemos:

$$n = \left(\frac{2V}{23,3mV} \right) = 85,8$$

Por tanto el transformador tiene una ganancia de:

$$n = 85,8$$

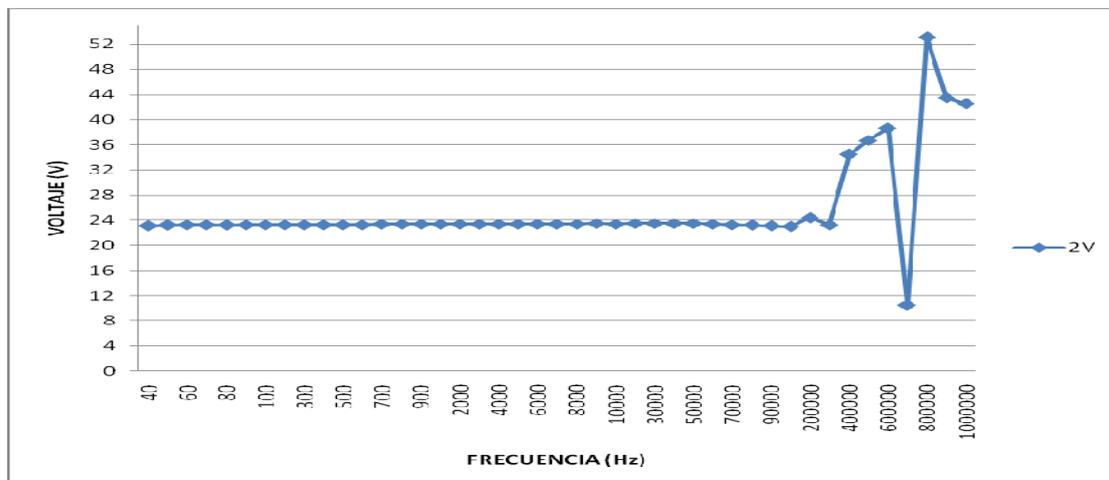


Fig. 2.30. Respuesta del transformador. Fuente: Autor

La figura 2.30, se obtuvo mediante unas pruebas de laboratorio, en las que se aplicó un voltaje constante de 2VAC en el secundario del transformador elevador de alto voltaje; variando de frecuencia de 10Hz hasta 2GHz, aumentando estos valores de forma logarítmica, y obteniendo la respuesta en el primario del transformador. Se aplicó la variación en frecuencia de la señal en el secundario y no en el primario, debido a las características de fabricación del transformador; porque este cuenta con pocas espiras en el primario.

Con el análisis de los datos obtenidos se logró determinar el rango de frecuencia en el cual el transformador debe trabajar, este rango es de 40Hz-300KHz, con el fin de garantizar una ganancia con valores de salida constante, sin que la señal presente alguna distorsión en el secundario del transformador.

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor): Consiste en un transistor de efecto de campo basado en la estructura MOS. El MOSFET implementado inicialmente es de referencia IRF-840 (ver anexo B), el cual se cambió por la referencia IRFP 260N (ver anexo C), para disminuir el tamaño del circuito de potencia y aumentar la intensidad del arco eléctrico. Este elemento se debe adherir a una placa de aluminio como se muestra en la figura 2.31, con el fin de disipar el calor y mejorar la conducción de la corriente hacia el transformador elevador de alto voltaje.

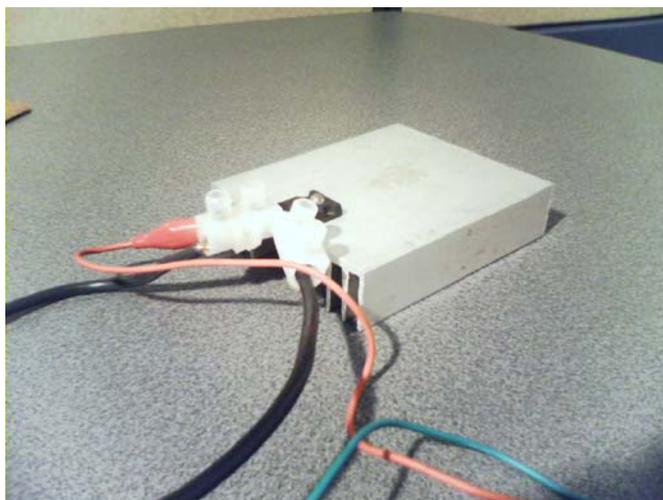


Fig. 2.31. Foto del dispositivo de conmutación. Fuente: Autor

Condensador: Es un dispositivo que almacena carga eléctrica. Un condensador está formado por dos placas metálicas separadas por una lámina no conductora o dieléctrico, al conectar una de las placas a un generador, ésta se carga e induce una carga de signo opuesto en la otra placa, se encarga del filtrado de la señal rectificadas, el almacenamiento y suministro de energía. Debido a la dificultad para obtener el valor de capacitancia calculado, se debe hacer un arreglo de varios condensadores como se ilustra en la figura 2.32, para lograr un valor aproximado de la capacitancia calculada para la fuente.

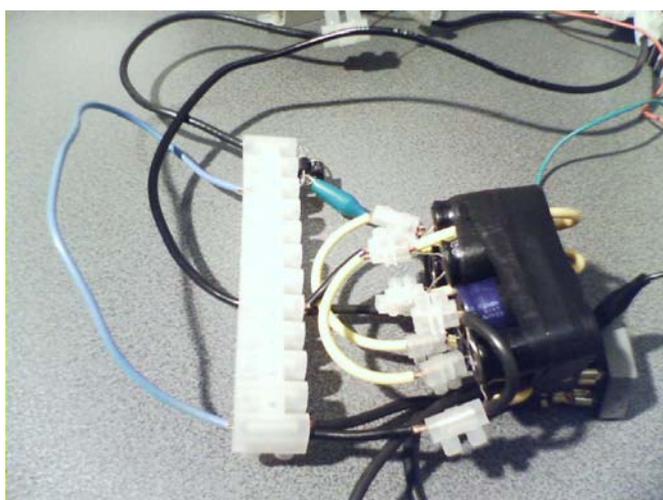


Fig. 2.32. Foto del banco de condensadores. Fuente: Autor



Diodo: Es el componente electrónico que permiten el paso de la corriente en un solo sentido, desde el cátodo hacia el ánodo, este se encarga de la rectificación de la señal de AC y la protección del flujo de corriente hacia el circuito de control.

Circuito integrado regulador de voltaje LM7812: Este integrado se encarga de realizar la regulación y mantenimiento del voltaje de aproximadamente 12VDC con una corriente de 500mA para el circuito de control (ver anexo D).

En la primera parte del diseño se encuentra la rectificación y filtrado de la señal de AC (Corriente Alterna) tomada de la red, Debido a que el circuito de control y el circuito de potencia trabajan con DC (Corriente Directa), proceso de conversión que se explica en detalle a continuación.

2.4.2 Rectificación. [3].

A continuación en la figura 2.33 se presenta el diagrama de bloques del proceso de rectificación de la señal para el circuito.

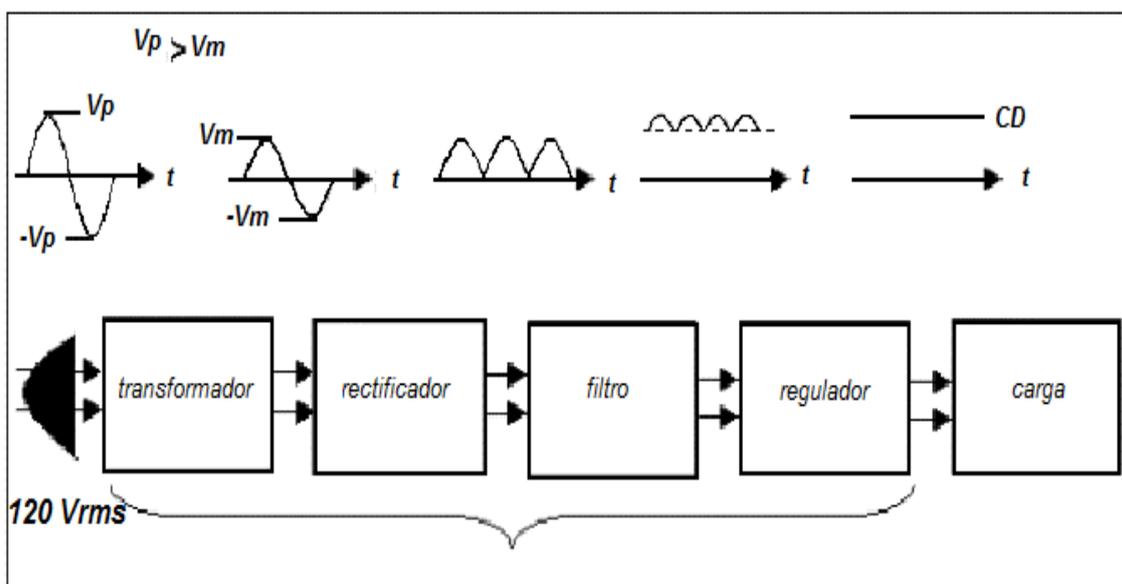


Fig. 2.33. Diagrama de bloques del filtrado y rectificación de la señal. [16].



A simple vista se destaca que cada parte esta dispuesta según el orden lógico del funcionamiento, y se describe que tipo de señal se esta obteniendo desde la entrada de corriente alterna, el transformador, la parte de rectificación de la señal, el filtrado, la regulación, hasta que tipo de señal llegara a la carga.

En la conversión de corriente alterna en corriente continua se utiliza la característica del diodo rectificador, el cual se comporta como un interruptor cerrado cuando tienen polarización directa y un interruptor abierto cuando tienen polarización inversa. Cuatro diodos constituyen el puente rectificador usado en el diseño de la fuente para la rectificación de la señal AC, en la figura 2.34 se muestra la configuración de los diodos eliminando el uso de la conexión con TAP central del transformador TR6. Al no usar esta conexión, la tensión en la señal rectificada es el doble de la que se obtiene en la conexión de un rectificador de onda completa; a continuación se explica brevemente el funcionamiento de esta configuración.

En el semiciclo positivo de la señal de tensión de AC de la red, los diodos D_2 y D_3 conducen, los diodos D_1 y D_4 conducen durante el semiciclo negativo de la señal de tensión de la red, lo que produce otro semiciclo positivo en la señal de salida conectada a la resistencia R_L . En consecuencia resulta una señal de onda completa en la resistencia R_L , que se observa en la figura 2.35.

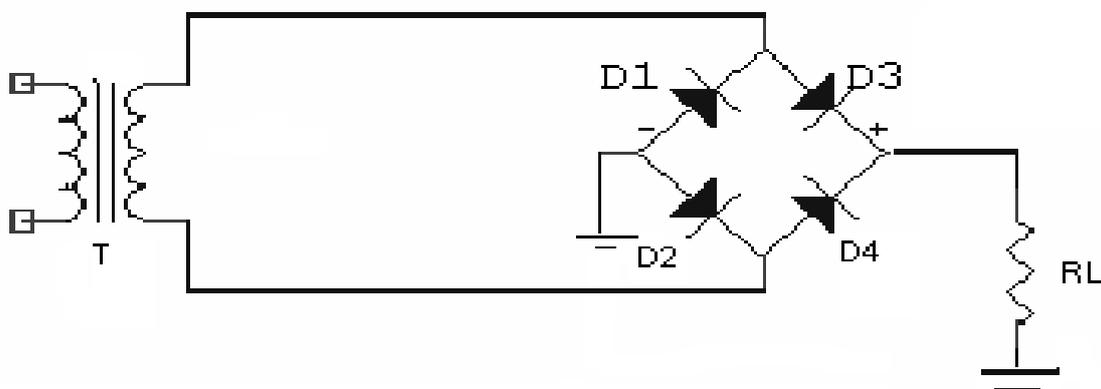


Fig. 2.34. Rectificador de puente. Fuente: Autor



La tensión pico en el secundario está dada por la ecuación:

$$V_p = V_s * \sqrt{2} \quad (2.7)$$

La frecuencia de la señal rectificadora es de 120Hz, la tensión pico después de rectificadora la señal es:

$$V_p = V_{p2} - 1.4V \quad (2.8)$$

La tensión de continua después de la rectificación esta dada por la ecuación:

$$V_{cc} = 2 V_p / \pi \quad (2.9)$$

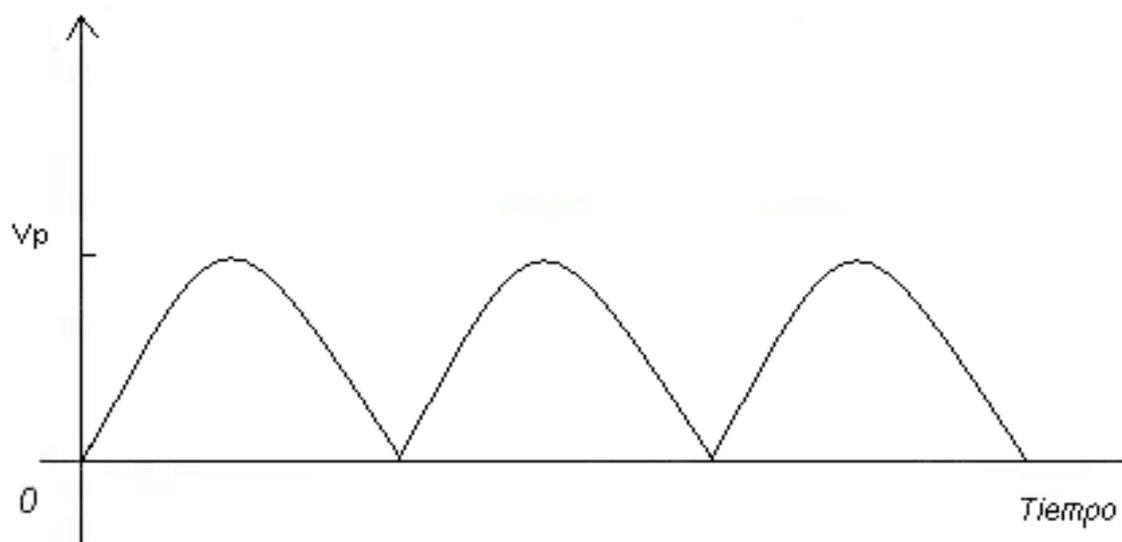


Fig. 2.35. Señal de onda completa. Fuente: Autor

2.4.3 Filtrado.

La señal de tensión que se obtiene después del rectificador no es constante, y por esto se debe hacer un filtro que haga constante esta señal. Con el filtro de onda completa se reduce el rizado. La frecuencia de rizado de la señal es de 120Hz, por lo que el condensador se carga el doble de veces en el mismo lapso de tiempo, lo que indica que tiene la mitad del tiempo de descarga; por tanto, el rizado de la señal es menor y el voltaje de salida de DC, presenta un valor aproximado al valor pico de tensión.



El rizado de la señal DC debe ser menor al 20% del valor del voltaje de salida en la resistencia RL.

El voltaje de rizado se puede determinar por:

$$V_R = I / f C \quad (2.9)$$

En donde:

V_R = Tensión de rizado pico a pico

I = Corriente continua en la carga

f = Frecuencia de la tensión de rizado

C = Capacitancia

El transformador TR6 a usar en el diseño de la fuente de voltaje tiene tensiones en el secundario de 12V y 18V rms.

Para la elección del condensador de filtrado, se trabaja con el devanado de mayor voltaje; debido a que éste permite la elección de condensadores con capacitancias menores.

El voltaje pico en el secundario según la ecuación (2.7) es:

$$V_{p2} = 18V * \sqrt{2} = 25.45 V$$

El voltaje pico después de la rectificación según la ecuación (2.8) es:

$$V_p = 25.45 V - 1.4 V = 24 V$$

Se desea un voltaje de rizado del 10% del voltaje pico; por tanto

$$V_R = 2.4 V_{pp}$$



Con una corriente de 10A de acuerdo al diseño, con un margen de seguridad de 100mA adicionales se obtiene:

$$C = 10A / (120Hz * 2.4 V) = 34.722 \mu F$$

Se escoge un valor comercial de 35.000 μF .

La tensión de rizado es:

$$V_R = 10A / (120Hz * 35.000 \mu F) = 2.38V_{pp}$$

Que equivale al 10% del voltaje pico.

2.4.4 Pruebas del Diseño.

Las primeras pruebas realizadas al circuito generador de arcos eléctricos fueron en la simulación de la fuente sin carga y con carga, con el fin de comprobar los datos teóricos, y después de esto se realizó el montaje y prueba de funcionamiento de todo el circuito.

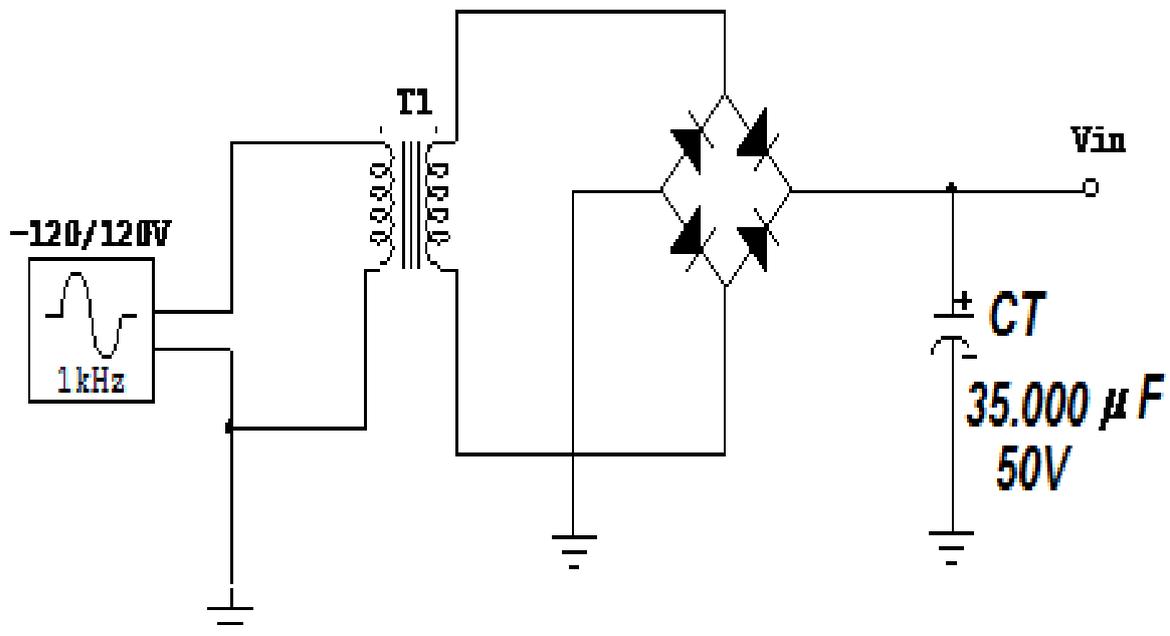


Fig. 2.36. Esquemático de la fuente final de energía. Fuente: Autor



Resultado de la Simulación: La simulación de la fuente final comprueba el funcionamiento de esta con los valores de 12VDC y 10A (ver figuras 2.37, 2.38), lo que indica que los cálculos realizados son correctos y la señal con la fuente real, tendrá una aproximación a la simulación, con la diferencia de un pequeño rizado de aproximadamente el 10% del V_p , que ratifica los parámetros establecidos de voltaje y corriente. Se obtuvo la señal (figura 2.40) de la fuente con el circuito de control y potencia (figura 2.39), con la comprobación del diseño y mantenimiento de la energía, puesto que la señal se mantiene constante sin ninguna interrupción.

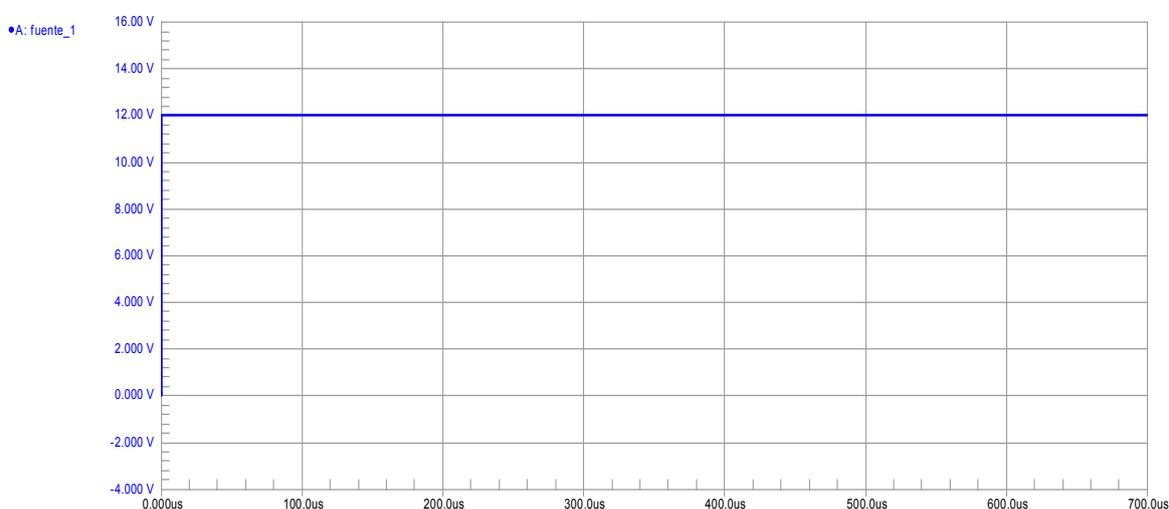


Fig. 2.37. Señal del voltaje de salida de la fuente final. Fuente: Autor

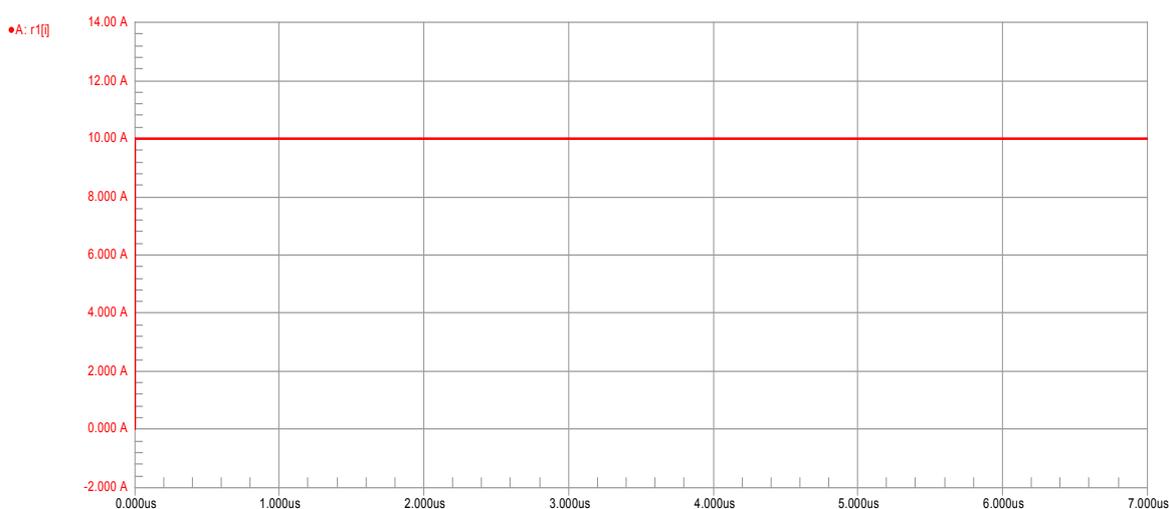


Fig. 2.38. Señal de la corriente de salida de la fuente final. Fuente: Autor

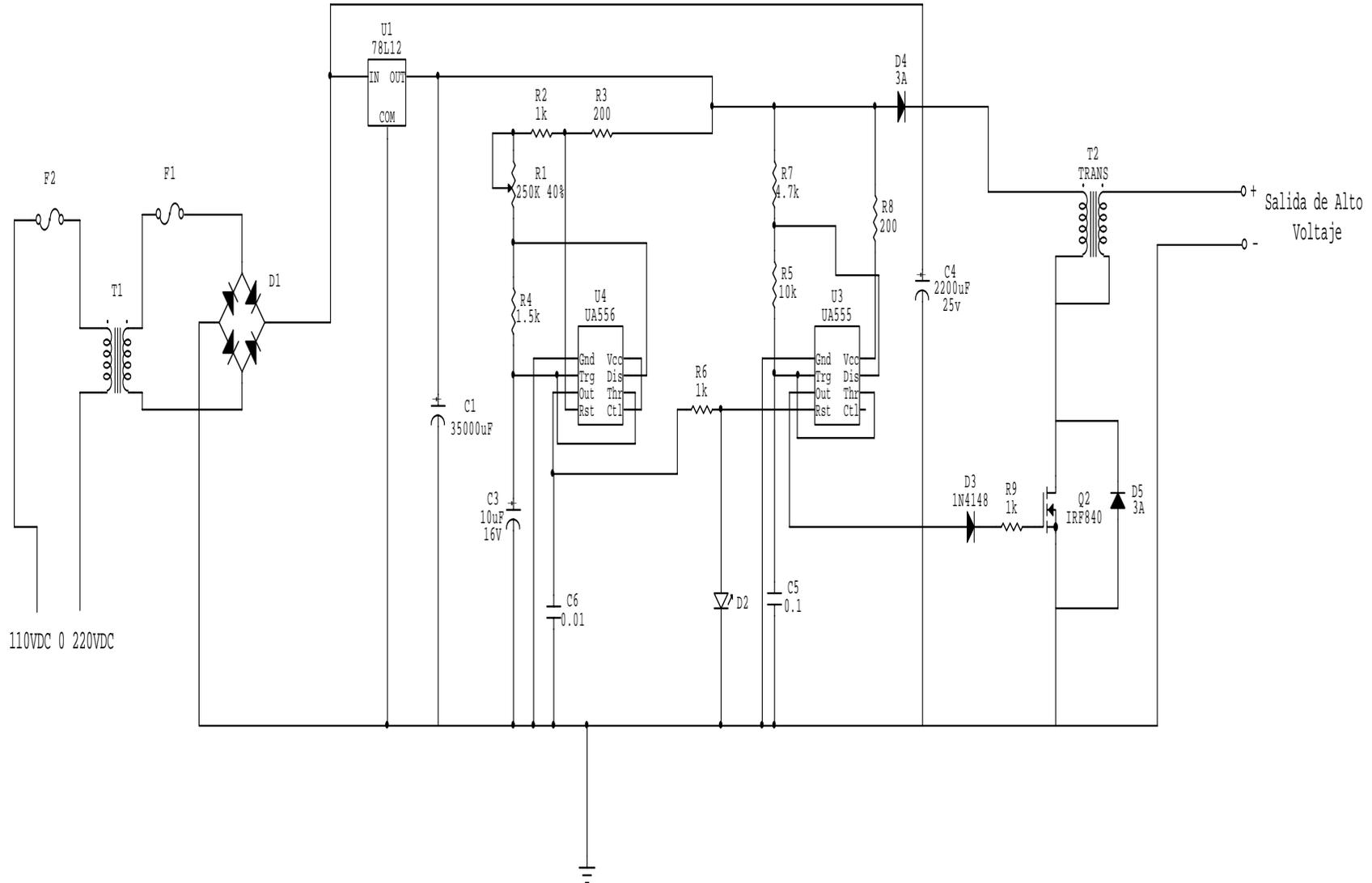


Fig. 2.39. Fuente final conectada al circuito generador de arcos eléctricos. Fuente: Autor

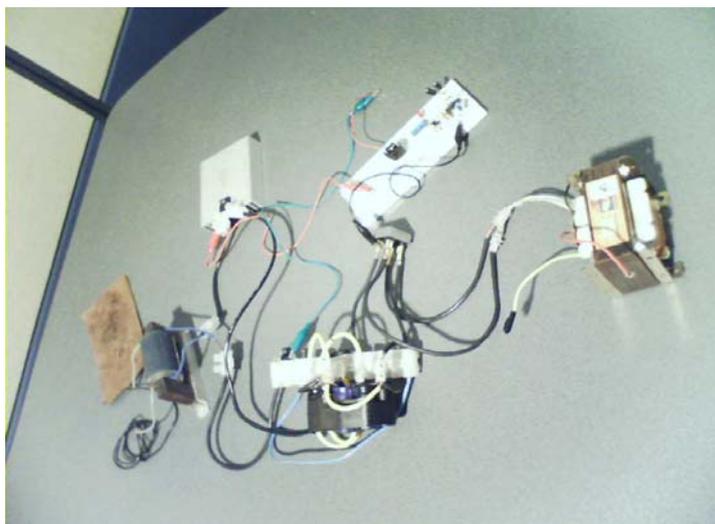


Fig. 2.40. Fotografía de la fuente final conectada al circuito generador. Fuente: Autor

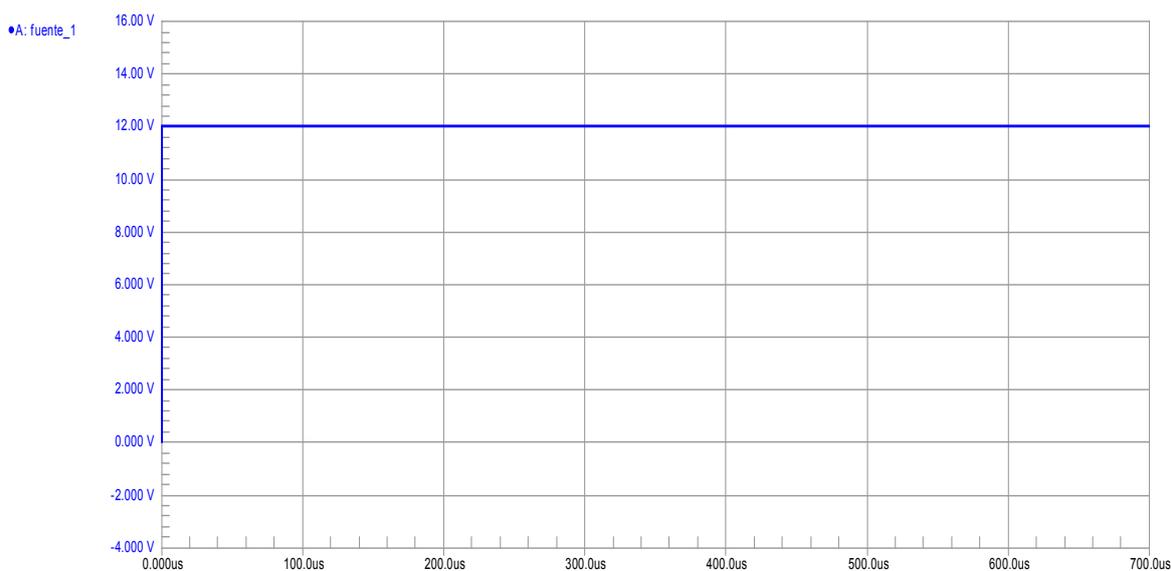


Fig. 2.41. Señal de salida de la fuente final con carga. Fuente: Autor

Resultado Experimental: El diseño de la fuente surte los 12 VDC y 10A en la salida sin carga, al realizar la articulación de esta con el circuito generador se pudo observar que esta tiene un óptimo desempeño, puesto que se pudo generar los arcos eléctricos con buena intensidad y con tiempo requerido para mantener ionizado un gas.



Análisis de la Fuente: Esta fuente cumplió los parámetros establecidos, y solo se realizó una modificación en la parte de potencia, se cambió los tres IRF 840 por un solo integrado IRFP-260N, para lograr una mayor intensidad en el arco eléctrico generado y disminuir el tamaño de la fuente. El diseño final de la fuente se encuentra en el anexo E.

2.5 PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN CON LA FUENTE GENERADORA DE ARCOS ELÉCTRICOS. [2]

Con el diseño de la fuente para generar arcos eléctricos se realizó el montaje del circuito para obtener el arco eléctrico, y se acondicionó dos láminas de cobre soldadas que cumplen la función de tierra física, y un cable AWG16 como electrodo de alto potencial.

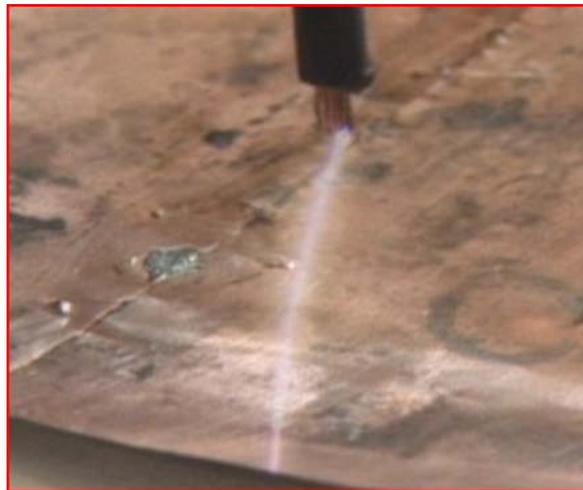


Fig. 2.42. Arco eléctrico. Fuente: Blanquicett J.B., Quintero C.S., González C.P., Mantilla J.C. Septiembre de 2007.

Teniendo el arco eléctrico y usando como medio dieléctrico el aire, se desarrollaron los siguientes experimentos:



Confinamiento del arco eléctrico en un medio saturado de humo producto de un proceso de incineración: Se genera una disipación lenta del humo causada por la generación de iones negativos del arco eléctrico. La evidencia de la generación de iones negativos se da en el olor característico a límpido que se produce en el ambiente al momento generarse el arco (ver figura 2.43).

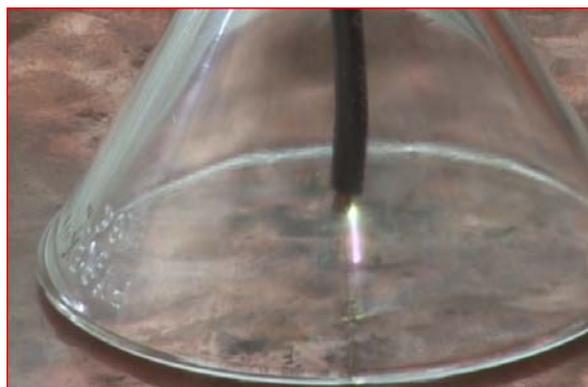


Fig. 2.43. Arco eléctrico en gas confinado. Fuente: Blanquicett J.B., Quintero C.S., González C.P., Mantilla J.C. Septiembre de 2007.

2.5.1 Exposición del Cigarrillo al Arco Eléctrico.



Fig. 2.44. Arco eléctrico en cigarrillo. Fuente: Blanquicett J.B., Quintero C.S., González C.P., Mantilla J.C. Septiembre de 2007.

De acuerdo a la figura 2.44, se toma un cigarrillo y se expone al arco eléctrico. Cuando el arco presenta una mayor intensidad, y este se aplica en un solo punto



del cigarrillo, se produce un proceso de incineración que deja el cigarrillo como se muestra en la siguiente figura 2.45.



Fig. 2.45. Residuo del cigarrillo. Fuente: Blanquicett J.B., Quintero C.S., González C.P., Mantilla J.C. Septiembre de 2007.

Cuando el arco se utiliza a baja intensidad, sin concentrarlo en un solo punto, haciendo un barrido por el cuerpo del cigarrillo, no se produce incineración. Las paredes del cigarrillo que están pegadas con la lámina se humedecen y se genera un pequeño depósito líquido en el piso de cobre, lo que podría inferirse como un posible proceso de deshidratación.

2.5.2 Exposición de Grano de Café a al Arco Eléctrico



Fig. 2.46. Grano de café tratado. Fuente: Blanquicett J.B., Quintero C.S., González C.P., Mantilla J.C. Septiembre de 2007.

Como se puede apreciar en la figura 2.46, se experimento con un grano de café a la exposición del arco eléctrico. El arco eléctrico con mayor intensidad, concentrado en un punto, incinera el grano, mientras que con una menor intensidad del arco aplicada en forma de barrido sobre el grano de café, se obtiene una especie de tostado sobre la cáscara del grano, generándose un fuerte olor a café. No se evidencian procesos de deshidratación.



2.5.3 Exposición del Icopor al Arco Eléctrico

Se experimento con un poco de icopor de diferentes tamaños completamente secos.



Fig. 2.47. Icopor tratado. Fuente: Blanquicett J.B., Quintero C.S., González C.P., Mantilla J.C. Septiembre de 2007.

Cuando el icopor se expone al arco eléctrico de alta intensidad y concentrado en un punto, tal como en los casos anteriores, se genera un proceso de incineración, pero al disminuir la intensidad del arco y al aplicarla en forma de barrido, el icopor se degrada sin que se genere incineración del mismo (*Efecto inverso al cambio de un maíz pira en crispela*).

2.5.4 Exposición del Vaso Plástico al Arco Eléctrico



Fig. 2.48 Plástico tratado. Fuente: Blanquicett J.B., Quintero C.S., González C.P., Mantilla J.C. Septiembre de 2007.

En esta instancia se puede generalizar el caso en el cual a una mayor intensidad y un punto fijo de concentración del arco, se produce incineración del material, tal



como sucede con el plástico; mientras que a baja intensidad y aplicando el arco de forma distribuida, el plástico se encoge por causa de las altas temperaturas que se generan en el arco sin provocar incineración.

Al final del proceso se obtiene un residuo sólido de menor tamaño y de consistencia rígida.

2.5.5 Exposición del Papel Plastificado al Arco Eléctrico



Fig. 2.49. Papel plastificado tratado. Fuente: Blanquicett J.B., Quintero C.S., González C.P., Mantilla J.C. Septiembre de 2007.

Además de la incineración a alta intensidad, a baja intensidad y aplicando el arco de forma distribuida, se logra la separación del plástico (se encoge), pero el papel se incinera.

De estas pequeñas experiencias se puede inferir que la intensidad del arco eléctrico, su frecuencia y forma de aplicación juegan un papel fundamental en el tipo de resultado deseado.

El arco eléctrico en el aire constituye un ionizador básico, asociado a la generación de plasma de bajo nivel y muy ineficiente alrededor del arco eléctrico propiamente dicho. Cambiar o mejorar las características del plasma implica



cambiar el tipo de gas, el medio de confinamiento y el diseño de un reactor para su generación, además del control de algunas variables como el flujo de gas, la intensidad del arco, su frecuencia y forma de aplicación, y la temperatura del proceso.

Además de la eliminación de residuos, del proceso de experimentación podemos inferir que el plasma podría tener otro tipo de aplicaciones, tales como la deshidratación de algunos elementos, o procesos de separación de materiales, tal como lo hace una empresa brasilera con el TETRAPAK, envase hecho con tres materiales: 75% de papel (fibra larga), 20% de polietileno de baja densidad y 5% de aluminio, mediante la aplicación de la tecnología Thermal Plasma.

En el proceso tradicional de reciclado, se separaba al cartón de la alianza de plástico y metal, para destinarlos a las papeleras y la fabricación de utensilios plásticos respectivamente. El nuevo sistema permite reutilizar los tres materiales, convirtiendo el reciclaje en un negocio muy lucrativo y limpio, pues las emisiones producidas durante el proceso son casi nulas.

2.5.6 Pruebas Complementarias

Esta prueba consiste en la elaboración de un reactor que esta acondicionado para hacer circular un gas (Aire) y generar arcos eléctricos en el momento que circule el gas, para lograr la ionización de este. En el proceso de elaboración del reactor se asumió que este debe acoplarse a un compresor de aire (contenedor del gas), y debe conectarse a la fuente de alto voltaje (generadora de arcos eléctricos); con el reactor se ponen a interactuar los dos elementos anteriormente mencionados.

Con los recursos disponibles se elaboro el prototipo del reactor; como se observa en la figura 2.50, este se elaboro con un tubo metálico conductor y un tubo de plástico no conductor con el fin de aislar las conexiones del contenedor del gas y el generador de arcos eléctricos.



Fig. 2.50. Fotografía de los reactores. Fuente: Autor

En la siguiente figura 2.51 se observa la conexión interna del reactor, que consiste en una varrilla interna que sirve como ánodo y la estructura metálica del reactor, sirve como referencia a tierra, esta estructura se encuentra cubierta con cinta aislante, y cada conexión se encuentra conectada de forma aislada.



Fig. 2.51. Conexión interna de los reactores. Fuente: Autor

En el interior del reactor la varrilla se encuentra aislada en los dos extremos del tubo con un material acrílico y este tiene agujeros para garantizar el flujo del aire por el reactor.



Fig. 2.52. Fotografía de la parte interna de los dos reactores. Fuente: Autor

Con la generación del arco eléctrico en el reactor, se observó la concentración de este arco en un sitio determinado de este, el punto de concentración se produjo en la parte más cercana entre el ánodo y la superficie metálica del reactor. Esto provocó la incineración del acrílico en el punto donde se concentró el arco eléctrico en uno de los prototipos observados en la figura 2.53.



Fig. 2.53. Fotografía de los reactores. Fuente: Autor

Después de poner a prueba el reactor, inyectándole aire y generando el arco eléctrico al tiempo para que estos interactúen, se determinó que es indispensable que el ánodo interno debe estar concéntrico, para garantizar la distribución proporcional del arco eléctrico en toda la estructura metálica del reactor y lograr una mayor ionización del gas, con esto se evita que el arco eléctrico se centre en un solo punto, sin generar daños internos del reactor.



CONCLUSIONES

Los desechos son un problema que requiere solución para el bien de la Tierra y la humanidad, debido al impacto que estos ocasionan al medio ambiente y lo que repercute en el hombre, por esto es indispensable implementar la tecnología para tratar esta problemática, puesto que se ha comprobado que el plasma es una herramienta eficiente sin efectos dañinos de alguna índole, mediante el proceso de degradación de desechos, por tanto es indispensable fomentar y orientar la investigación en el desarrollo y comprensión de esta tecnología para utilizarla en el tratamiento de los desechos industriales de la región y del país, para mitigar esta problemática como lo hacen algunos países en el mundo.

Para realizar el diseño de una fuente generadora de arcos eléctricos implementada en la creación del plasma, es necesaria la documentación previa sobre este fenómeno para lograr inferir en los parámetros que este requiere, porque varían sus características de acuerdo a la aplicación, el tipo y la forma como este se pretende obtener y confinar para la respectiva implementación y análisis del fenómeno.

Los prototipos implementados no proporcionaban la potencia requerida en la generación de arcos eléctricos, debido a la corriente que pedía el circuito en el momento de generar el arco entre los dos electrodos, lo que provocaba que las fuentes implementadas presentaban caídas de voltaje, sin concebir arcos eléctricos con una buena intensidad y un tiempo prolongado.

Gracias a las pruebas con los prototipos de fuentes se caracterizó el circuito generador de arcos eléctricos, por lo cual se pudo enfocar la búsqueda del diseño de la fuente que alimentara el circuito de control y el circuito de potencia, llegando al diseño de una fuente un poco rústica pero efectiva que cumple los parámetros requeridos de potencia demandada por el circuito y proporciona la energía solicitada para la generación de los arcos eléctricos.



Para la elaboración del reactor se debe tener en cuenta la resistencia de los materiales frente al calor, porque el arco eléctrico proporciona altas temperaturas y estas pueden generar deterioro en el material que esté constituido el reactor, además la superficie debe ser homogénea en su interior, con el ánodo interno centrado, para que el arco eléctrico se distribuya proporcionalmente en el interior del reactor, puesto que si el ánodo no está debidamente centrado, el arco eléctrico se puede concentrar en un solo punto de este.

El plasma se puede utilizar en diferentes aspectos, en el ámbito de la investigación y por lo cual la universidad debe enfocar las investigaciones, en aspectos que ayuden en la solución de las problemáticas que aquejan a la región, el país y el mundo, con la adquisición y desarrollo de nuevas tecnologías que permitan investigaciones concretas y efectivas.



REFERENCIAS

- [1] Revista Ambientum. Eliminación de residuos con plasma-Suelos y Residuos, Edición 2004
- [2] Quintero C., González C., Mantilla J., Informe Final de Investigación, Estudio de factibilidad de la utilización del plasma como herramienta de tratamiento de residuos. DGI-UPB. 2007.
- [3] Proyecto de Grado. Fuente Dual Reguladora de Voltaje, Jorge E Ardila, Nelson E. Flechas, U.P.B. Facultad de Ingeniería Eléctrica, 1997.
- [4] <http://www.sociedadcolombianadefisica.org.co/revista/vol38>, febrero 2007.
- [5] http://efdawwwserver.ipp-garching.mpg.de/multimedia/downloads/brochures/energy_es.pdf, agosto 2007.
- [6] Yokoyama T., Kogoma M., Moriwaki T., and Okazaki S., The Mechanism of the Stabilisation of Glow Plasma at Atmospheric Pressure. J. Phys. D: Appl. Phys. 23 (1990)1125-1128.
- [7] Rashid Muhammad H., Electrónica de Potencia – Circuitos Dispositivos y Aplicaciones, 3ra Edición, Editorial Pearson, 2004.
- [8] Malvino Albert Paul, Principios de Electrónica; 5ta Edición, Editorial Mc Graw Hill Interamericana de España S.A., 1994
- [9] Sedra Adel S. Circuitos Microelectronicos, 4ta Edición, Editorial Mexicana, 1999.
- [10] Fitzgerald A. E. Maquinas Eléctricas, 5ta Edición, Mc Graw Hill USA, 1992.



- [11] Chapman Stephen J. Maquinas Eléctricas, 2da Edición, Mc Graw Hill Interamericana de España S.A.,
- [12] Kosow Irving L, Maquinas Eléctricas y Transformadores, 2da Edición Prentice-Hall Hispanoamérica S.A., 1993.
- [13] <http://portal.ins-cr.com/AccesoCabezal/Glosario/Arco+el%C3%A9ctrico.htm>, agosto del 2007.
- [14] http://www.fisicanet.com.ar/fisica/electrotecnia/ap07_generacion_transporte.php, abril del 2007.
- [15] <http://www.Plasmatreat.com>, febrero del 2007.
- [16] <http://www.doschivos.com/trabajos/tecnologia/763.htm>, junio del 2007
- [17] <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal/XVi.pdf>, Octubre 2007.
- [18] Revista CEKIT, Vol. 30, Edición 1997.
- [19] <http://cipem.uniandes.edu.co/Investigacion1/SinPlasma.htm>, Junio del 2007.
- [20] http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/plazma/basics_es.html, marzo del 2007.
- [21] <http://www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/Mplasma.html>, marzo del 2007.
- [22] Revista ELECTRONICA DIGITAL, Vol. 39, Edición 1991.



ANEXOS



ANEXO A.







ANEXO B





ANEXO C





ANEXO D

