

**DESARROLLO DE UN MODELO FUNCIONAL PARA LA PRODUCCIÓN DE
OZONO**

HAROLD DAVID GIL MUÑOZ

HENRY MELGAREJO VELANDIA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y

DE TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2017

**DESARROLLO DE UN MODELO FUNCIONAL PARA LA PRODUCCIÓN DE
OZONO**

HAROLD DAVID GIL MUÑOZ

HENRY MELGAREJO VELANDIA

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

Director

RODRIGO CORREA.

Doctor en Ciencia e Ingeniería de Polímeros.

Codirector

MANUEL ROA.

Master en Polímeros y Biopolímeros.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y

DE TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2017

DEDICATORIA 1

Gracias a Dios por darme la fortaleza para emprender este camino y por enviar tantos ángeles a mi vida, gracias a ellos nada esto hubiera sido posible.

A mi madre y mi hermano que siempre han sido el motor de mi vida y por todos los sacrificios que han hecho para que mi camino fuera el correcto y pudiera cumplir mis sueños.

A alba lucia, Walter Marín, Juliana Marín y Walter José Marín que han sido una familia para mi, por brindarme su apoyo y cariño, logrando que sea la persona y el profesional que soy hoy día.

Gracias a Nelly Ríos por llegar a mi vida y enseñarme a ver la vida de otra manera, gracias a su apoyo y amor incondicional pude superar muchos obstáculos en en este proceso.

Gracias a toda mi familia y amigos que aportaron un granito de arena con buenas intenciones y apoyo en todos los momentos de mi carrera.

Gracias a la universidad Industrial de Santander y en especial a la escuela de eléctrica electrónica y telecomunicaciones por sus enseñanzas y por formarme para la vida profesional, gracias a todos mis profesores por compartir su sabiduría y por todos los consejos dados en cada clase.

DEDICATORIA 2

A mis padres por apoyarme en todo el camino

A mis amigos por estar junto a mi todo el tiempo

A los profesores por todas las lecciones

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director Rodrigo Correa por sus buenos consejos, paciencia y por ser un gran apoyo en toda la consecución de este proyecto.

A nuestro codirector Manuel Roa por ser un gran apoyo.

Al ingeniero Manuel Campos por la ayuda prestada y el tiempo brindado.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO | 14 |
| 1.1. Ojetivo General | 14 |
| 1.2. Objetivos Específicos | 14 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 15 |
| 2.1. El Ozono..... | 15 |
| 2.2. Metodos de Obtención del Ozono..... | 15 |
| 2.3.1. Generación de Ozono | 16 |
| 2.3.2. Generación de ozono por descargas eléctricas | 17 |
| 2.4. Elementos que Forman Parte de un Equipo Generador de Ozono | 18 |
| 2.4.1. Celda Generadora de Ozono | 18 |
| 2.4.2. Fuente de Alimentacion..... | 19 |
| 2.5. Potencial de Oxidación del Ozono..... | 19 |
| 2.6. Oxidación de Crudos Pesados..... | 21 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 22 |
| 3.1. El transformador Flyback..... | 22 |
| 3.2. Circuito Driver..... | 23 |
| 3.3. Celdas Generadoras | 25 |
| 3.4. Alimentación..... | 26 |
| 3.5. Modelo funcional Completo | 26 |
| 4. PRUEBAS | 28 |
| 4.1. Frecuencia de Operación. | 28 |

| | |
|---|----|
| 4.2. Operación del circuito driver..... | 29 |
| 4.3. Operación de la celda generadora de Ozono..... | 30 |
| 4.4. Pruebas Termograficas..... | 33 |
| 4.5. Mediciones de Parámetros del Modelo funcional..... | 36 |
| 4.5.1.Eficiencia Eléctrica..... | 36 |
| 4.5.2.Medición de Ozono | 36 |
| 5. COSTOS | 39 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 40 |
| 7. RECOMENDACIONES..... | 34 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 35 |
| ANEXOS..... | 36 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Formación de la molécula de ozono..... | 16 |
| Figura 2. Celda generadora de ozono por descargas eléctricas | 17 |
| Figura 3. Partes que forman un equipo generador de ozono | 18 |
| Figura 4. Transformador tipo Flyback..... | 23 |
| Figura 5. Esquema del driver para flyback. | 24 |
| Figura 6. PCB driver flyback..... | 24 |
| Figura 7. Celdas Generadoras de Ozono..... | 25 |
| Figura 8. Modelo funcional Final. Vista superior (a). Vista Frontal (b). Vista Lateral (c)..... | 27 |
| Figura 9. Salida del LM555 a frecuencia mínima. | 28 |
| Figura 10. Salida del LM555 a frecuencia maxima..... | 29 |
| Figura 11. Salida del LM555 frecuencia de operacion. | 30 |
| Figura 12. Sonda de alto Tensión. | 30 |
| Figura 13. Conexión de la Sonda al Circuito. | 31 |
| Figura 14. Señal de operación de la celda generadora de ozono. | 31 |
| Figura 15. Parametros de operación celda generadora de Ozono..... | 32 |
| Figura 16. Parametros de operación celda generadora de Ozono..... | 32 |
| Figura 17. Efecto Corona en la celda. Vista Superior..... | 33 |
| Figura 18. Efecto Corona en la celda. Vista Frontal. | 33 |
| Figura 19. Fotografía Termica 1..... | 34 |
| Figura 20. Fotografía Termica 2..... | 34 |
| Figura 21. Fotografía Termica 3..... | 35 |
| Figura 22. Valores de Ozono medidos con equipo cdmf..... | 38 |
| Figura 23. Valor de Ozono en el ambiente medido con equipo cdmf..... | 38 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Potencial de Oxidación de algunas Sustancias..... | 21 |
| Tabla 2. Costos del Modelo funcional | 39 |

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE UN MODELO FUNCIONAL PARA LA PRODUCCIÓN DE OZONO

AUTORES: HAROLD DAVID GIL MUÑOZ, HENRY MELGAREJO VELANDIA **

PALABRAS CLAVES: OZONO, OXIDACIÓN, CRUDO PESADO, DESCARGA DE BARRERA DIELECTRICA, CELDA COAXIAL, EFECTO CORONA.

DESCRIPCIÓN:

En este documento se presenta una alternativa de diseño de un generador de ozono portátil funcionando a presión y temperatura ambiente, el cual es alimentado por una fuente conmutada de alta tensión capaz de entregar hasta 20 kV a una frecuencia de 11,88 kHz. Se tuvo en cuenta los diferentes parámetros que pueden afectar la generación del ozono así como aquellos que producen una degradación acelerada de este.

El ozono es producido en una celda coaxial operando bajo el principio de descarga de barrera dieléctrica para conseguir la disociación de moléculas de oxígeno a través del efecto coronan las cuales de recombinan para formar el ozono. El aire de entrada es proporcionado por un ventilador que también tiene la función de sistema de refrigeración. Se realizaron mediciones del volumen de ozono producido mediante un equipo estándar normalizado para tal fin. De igual manera se hicieron pruebas eléctricas durante el funcionamiento del generador. Además de detectaron los puntos calientes en el modelo mediante una cámara termográfica.

Este modelo funcional tiene como propósito realizar *oxidación de crudos pesados utilizando ozono in-situ* como método alternativo a los métodos tradicionales de oxidación y que hace parte del trabajo de investigación del estudiante de doctorado químico Manuel Roa, miembro del grupo CEMOS de la E3T.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Carlos Rodrigo Correa Cely, Doctor en Ciencia e Ingeniería de Polímeros. Codirector: Manuel Roa, Master en Polímeros y Biopolímeros.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF AN OZONE PRODUCTION FUNCTIONAL MODEL

AUTHORS: HAROLD DAVID GIL MUÑOZ, HENRY MELGAREJO VELANDIA**

KEY WORDS: OZONE, OXIDATION, HEAVY OIL, DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE, COAXIAL CELL, CORONA EFFECT

DESCRIPTION:

This document presents a design alternative of a portable ozone generator working at ambient pressure and temperature, which is feed by a high voltage switching source able to deliver as much as 20 kV at a frequency of 11,88 kHz. The different parameters that could affect the ozone generation as well as those parameters which speed the degradation were taken into account.

The ozone is produced in a coaxial cell operating under the principle of dielectric barrier discharge to accomplish the oxygen molecules dissociation by means of the corona effect the later are then recombined to form the ozone. The entrance air is provided by a fan which also has the function of cooling system. Measurements of the ozone volume were realized by means of a standard equipment normalized for this task. In the same way, electric tests were performed during the operation of the generator. Besides hot spots in the model were detected using a thermographic camera.

This functional model purpose is the oxidation of heavy oil using *in-situ* ozone as an alternative method to traditional oxidation methods and is part of the research work from the Doctorate in chemistry student Manuel Roa, member of the E3T group CEMOS

* Degree Project

** Physico-Mechanical Engineerings Faculty. Electrical, Electronics and Telecommunications School. Director: Carlos Rodrigo Correa Cely, Doctor in Polymers Science and Engineering. Codirector: Manuel Roa, Master in Polymers and Biopolymers.

INTRODUCCIÓN

El ozono es un gas muy inestable debido a su naturaleza química. Este se descompone en el medio ambiente y sus moléculas regresan fácilmente a su estado anterior como oxígenos independientes. Por tal motivo, es una sustancia que no se puede almacenar y para su uso es necesario producirlo *in situ*.

En el presente trabajo de grado se construyó un modelo funcional de generador de ozono lo suficientemente pequeño para trasladarlo a cualquier lugar, de fácil operación y capaz de generar un volumen de ozono según requerimientos operacionales.

El modelo funcional se diseñó para el proceso de oxidación continua de crudos pesados que se plantea en el trabajo de tesis doctoral **“Estudio de la electrodeposición de emulsiones de asfaltenos dopados con nanomateriales magnéticos y en presencia de campos magnéticos”** de nuestro codirector Manuel Roa y miembro del grupo de investigación CEMOS de la E3T.

El presente documento inicia con la descripción de sus objetivos aprobados en nuestro plan de trabajo de grado, seguido con algunos conceptos básicos en el capítulo dos, evitando transcribir la gran cantidad de literatura disponible en el tema de propiedades y de las formas de generación de ozono, esto con miras a hacer claridad en cómo se diseñó el modelo funcional, y evitar la transcripción de información ya plasmada en otras fuentes.

En el capítulo tres se detallan los componentes más importantes del modelo funcional, seguido de las mediciones y caracterizaciones que se describen en el capítulo cuatro y el cinco. Finalmente, las conclusiones y recomendaciones se sintetizan en el capítulo seis.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

El presente trabajo de grado, en modalidad de investigación, cuenta con una propuesta de generación de ozono mediante un equipo de bajo costo y fácil movilidad, que permita utilizarlo *in situ* en la oxidación controlada de crudos pesados. Para esto se sigue como base la normatividad internacional para la producción de ozono.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Disponer de un modelo funcional para la producción de ozono *in situ*.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para dar cumplimiento al objetivo general del trabajo de grado, se requiere:

1. Diseñar un circuito capaz de generar ozono de forma controlada, (ver pág. 28).
2. Construir un modelo funcional de generador de ozono acorde con el diseño descrito en el numeral anterior, (ver pág. 31).
3. Realizar pruebas con el modelo funcional construido y fundamentalmente relacionadas con el volumen de generación de ozono, consumo energético y confiabilidad-seguridad durante su operación, (ver pág. 38).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. EL OZONO

El ozono es un gas inestable que se produce naturalmente en la atmosfera del planeta por medio de la interacción entre los rayos ultravioletas del sol y el aire. Esta reacción descompone las moléculas de oxígeno allí contenidas y una vez separadas se asocian con otros oxígenos individuales para formar la molécula de ozono(O_3). Este gas es utilizado en múltiples aplicaciones industriales y medicinales gracias a su excelente capacidad oxidante.

2.2. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DEL OZONO

2.2.1. Método de radiación ultravioleta

El ozono que se forma por el método de radiación ultravioleta también es conocido como ozono estratosférico ya que es el lugar del planeta donde ocurre este fenómeno que permite la disociación de la molécula de oxígeno por medio de la intervención de los rayos ultravioletas del sol que generan una reacción química para obtener la molécula en cuestión.

2.2.2. Método efecto corona

Para formar la molécula de ozono se requiere de una celda formada por dos electrodos separados por una distancia del orden de los milímetros. Entre estos electrodos se genera una descarga eléctrica producto de una diferencia de tensión. De igual forma, entre los dos electrodos se ubica un material dieléctrico para de esta manera obtener el efecto corona a partir de la descarga eléctrica.

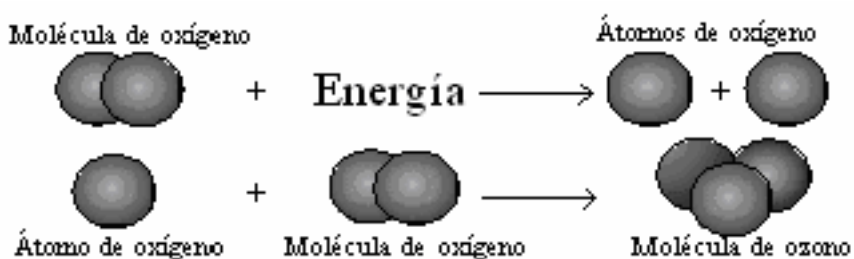
2.3 DESCARGAS DE BARRERA ELÉCTRICAS

La generación de ozono por el método de descargas eléctricas es la forma más eficiente para crear este gas altamente oxidante e inestable.

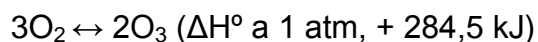
2.3.1. GENERACIÓN DE OZONO

El ozono se forma cuando se aplica la energía suficiente a la molécula de oxígeno para dissociarla y formar radicales libres de oxígeno; así se cumple la condición para formar una reacción entre una molécula y un átomo de oxígeno y obtener la molécula de ozono. En la siguiente figura se muestra el proceso de formación de la molécula de ozono¹.

Figura 1. Formación de la molécula de ozono



La formación del ozono se describe como una reacción endotérmica (consume energía), la cual se expresa como:



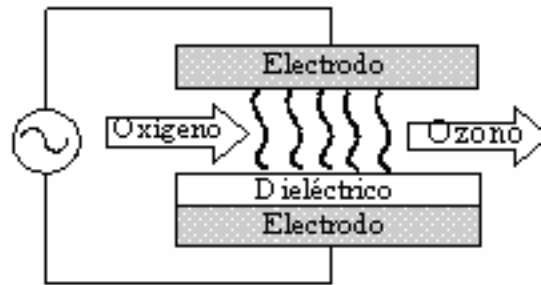
Las formas o métodos más utilizados para generar ozono son: descargas eléctricas, radiación ultravioleta y electrólisis. De estos tres métodos el más destacado, por el desempeño de su eficacia e implementación, es el método de la descarga corona. En la siguiente sección se describe su principio de funcionamiento y sus principales características.

¹ GUZEL-SEYDİM, Zeynep; GREENE, Annel y SEYDİM, A.C. Use of ozone in the food industry. En: LWT-Food Science and Technology. Abril, 2004. Vol. 37, No. 4, 454 p.

2.3.2. Generación de ozono por descargas eléctricas

Para formar la molécula de ozono se requiere de una celda, como se muestra en la figura, formada por dos electrodos separados por una distancia del orden de los milímetros. A este espacio se le conoce como espacio de descarga.

Figura 2. Celda generadora de ozono por descargas eléctricas



Sobre uno de los electrodos se coloca un material dieléctrico, y en el espacio de descarga se inyecta un flujo de aire o de oxígeno de alta pureza, el cual provee oxígeno para la formación del ozono. Para el funcionamiento de la celda, se conecta a los electrodos una señal eléctrica alterna, la cual permite la creación de un campo eléctrico intenso. Este campo eléctrico se encarga de acelerar los electrones que se encuentran en el espacio de descarga, de tal forma que, en la trayectoria del recorrido de estos electrones, colisionan con las moléculas de oxígeno y logran la disociación de sus átomos. El siguiente paso para la formación de la molécula de ozono es la reacción entre uno de estos átomos y una molécula de oxígeno^{2,21}.

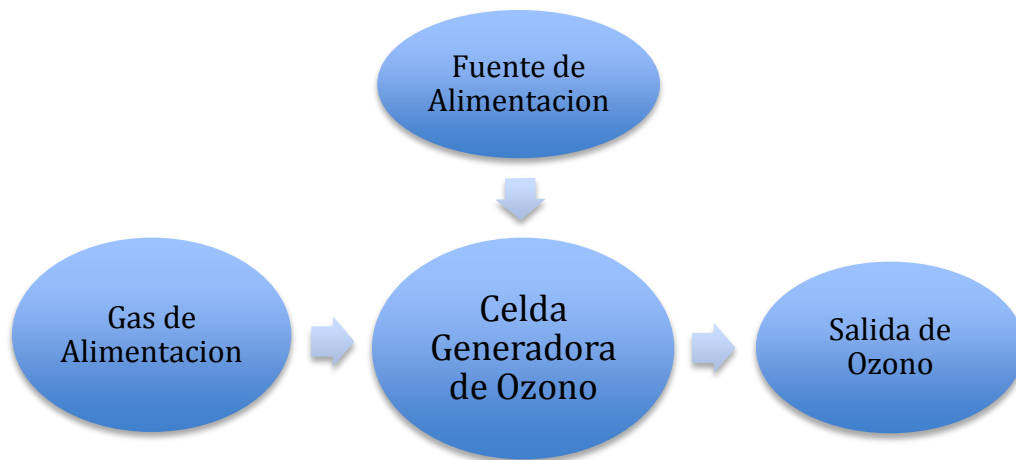
En la generación de ozono sólo de un 4% a un 12% de la energía es aprovechada para la formación de ozono, el resto es transformado en calor y luz. Este tipo de descarga eléctrica, que se realiza a través de un material aislante, da origen a la formación de delgados filamentos, que en su conjunto se denominan microdescargas. A este tipo de descarga eléctrica, se le conoce como descarga en barrera dieléctrica (DBD).

² W.H. TAY, S.L. YAP & C.S. WONG, Electrical Characteristics and Modeling of a Filamentary Dielectric Barrier Discharge in Atmospheric Air. Sains Malaysiana43(4)(2014):583–594

2.4. ELEMENTOS QUE FORMAN PARTE DE UN EQUIPO GENERADOR DE OZONO

Un equipo generador de ozono para aplicaciones de purificación del aire está constituido por los elementos que se muestran en la siguiente figura.

Figura 3. Partes que forman un equipo generador de ozono



2.4.1 CELDA GENERADORA DE OZONO

La celda generadora de ozono, es aquella donde se lleva a cabo la formación del gas ozono por medio del fenómeno llamado efecto corona. Las celdas generadoras de ozono se fabrican en dos formas geométricas: celdas de placas paralelas y cilíndricas. Los materiales que se utilizan en la construcción de una celda se eligen de tal forma que soporten la acción oxidante del ozono. Para el caso de los electrodos los materiales utilizados son el acero inoxidable, tungsteno y el titanio. Para el material dieléctrico se utiliza el vidrio, alúmina, polímeros y mica, entre otros.

2.4.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La fuente de alimentación se encarga de proporcionar una señal alterna cuyas características eléctricas (tensión y frecuencia), permitan generar el fenómeno de las micro descargas en el interior de la celda. Los equipos generadores de ozono pueden clasificarse de acuerdo a la frecuencia de operación de la fuente: generadores de baja frecuencia (50 a 60 Hz), mediana frecuencia (60 a 1000 Hz), y en alta frecuencia (más de 1000 Hz).

2.5. POTENCIAL DE OXIDACIÓN DEL OZONO

La capacidad que tiene una sustancia de oxidar el medio donde se encuentra se puede medir por medio del potencial de oxidación, y esta permite hacer una clasificación de los elementos que mejor cumplen dicha labor. Para el presente caso se puede observar en la siguiente tabla, las cualidades que posee el ozono que nos permiten lograr los objetivos planteados³, ver Tabla 1.

Tabla 1. Potencial de oxidación de algunas sustancias

| SUSTANCIAS | POTENCIAL DE OXIDACIÓN (V) |
|------------------------|----------------------------|
| Flúor | 3,03 |
| Radical Hidroxilo (OH) | 2,8 |
| Oxígeno Atómico | 2,4 |
| Ozono | 2,07 |
| Peroxido de Hidrogeno | 1,78 |
| Radical Per Hidroxilo | 1,7 |
| Permanganato | 1,68 |
| Acido Hipo Bromoso | 1,59 |
| Dióxido de Cloro | 1,57 |
| Acido Hipocloroso | 1,49 |
| Ácido Hipoiodoso | 1,45 |

³ Amparo Carolina Castañeda Jiménez, "PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA APLICADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO". Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito" especialización en recursos hidráulicos y medio ambiente 2014

| | |
|-------|------|
| Cloro | 1,36 |
| Bromo | 1,09 |
| Yodo | 0,54 |

Como se puede observar en la tabla anterior el ozono posee un alto potencial de oxidación y además si se maneja de manera óptima, controlando las concentraciones y el tiempo de exposición es una sustancia que no causa efectos secundarios en las personas, como es mencionado en la conferencia internacional del ozono hecha en Chicago y otros entes internacionales que dan recomendaciones sobre el contacto con este elemento. Esto permite que sea una de las mejores opciones para la oxidación de otras sustancias.

2.6. OXIDACIÓN DE CRUDOS PESADOS.

El petróleo pesado se caracteriza por presentar viscosidades entre los 10.000 y 100.000 centipoises (cP), razón por la cual sus operaciones de extracción, transporte y refinación, generan altos costos a la industria petrolera^{6,7}.

El crudo pesado, al igual que el convencional, está compuesto por cuatro familias de moléculas: Saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos, siendo estas últimas las de mayor influencia en las propiedades reológicas del crudo, debido su alto peso molecular, en especial los asfaltenos, que están compuestos principalmente por moléculas poliaromáticas, que contienen: grupos tiofénicos, piridínicos y ácidos carboxílicos. Adicionalmente este tipo de moléculas, poseen en su estructura el 20% de los metales presentes en el petróleo, correspondientes a Níquel, Vanadio y Hierro. Estos metales “envenenan” los catalizadores durante los procesos de refinación. Un crudo convencional contiene alrededor de un 8% de asfaltenos; en el caso de los crudos pesados, esta composición se incrementa entre el 10 al 30%^{8,15}.

De acuerdo con la teoría coloidal de *Leonartis*, las moléculas de los asfaltenos en el crudo se encuentran estabilizadas por la acción de las resinas, mediante fuerzas de Van der Waals, generando agregados resinas-asfaltenos. Cuando el

equilibrio de estas estructuras es alterado, ya sea por los cambios de presión, o la acción de alcanos lineales, generan la precipitación de los asfaltenos, conllevando a su depositación y taponamiento de yacimientos y tuberías en superficie^{14,20}.

Las razones anteriormente expuestas, describen él porqué los asfaltenos son considerados moléculas problemáticas en la industria petrolera, y la necesidad de plantear estrategias para su tratamiento y favorecer los procesos con crudos pesados^{6,11}.

La técnica empleada para separar los asfaltenos de la matriz de hidrocarburo, consiste en la precipitación de los asfaltenos aplicando alcanos lineales. Aunque este proceso es muy utilizado, presenta problemas como: altos consumos de solvente, riesgos a la salud de operadores, contaminación del medio ambiente. Además, este método no es selectivo ya que puede afectar también otro tipo de compuestos presentes.

Las moléculas más susceptibles de oxidación en la matriz de hidrocarburo, son las resinas, que al oxidarse adquieren una estructura similar a la de los asfaltenos, dicho cambio genera una alteración de la estructura coloidal, y por consiguiente la precipitación de los asfaltenos, los cuales, mediante procesos de filtración o electrodeposición, pueden ser retirados, y de esta manera obtener un hidrocarburo de menor viscosidad^{6,16}.

3. METODOLOGÍA

Mediante la información obtenida en la literatura, se conoce que para aumentar la eficiencia de un circuito generador de ozono se debe utilizar una señal pulsante a alta frecuencia,⁴. Esta señal permite alcanzar la alta tensión necesaria en los electrodos que permiten generar el efecto corona en el reactor evitando la producción de una chispa de alta tensión en forma de hilos que disminuiría la eficiencia de la celda, aumentando su temperatura y disminuyendo la vida media del ozono generado.

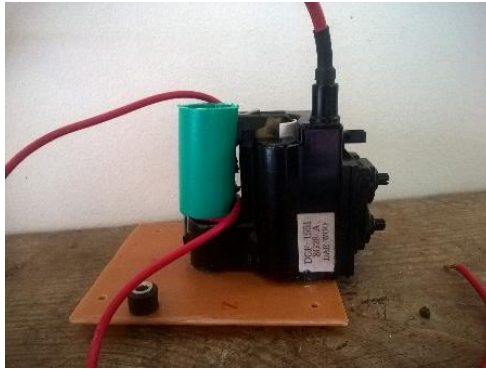
3.1. EI TRANSFORMADOR FLYBACK.

Como método de elevación de tensión se utilizó un transformador tipo flyback. Este tipo de transformador se caracteriza por estar diseñado para operar a alta frecuencia lo que contribuye a disminuir su tamaño y peso. Adicionalmente estos transformadores poseen internamente un multiplicador de tensión con lo cual se pueden llegar a tensiones de entre los 20 kV a los 30 kV.

Se eligió para este fin el flyback DCF-1551 el cual es capaz de proporcionar una tensión 25 kV a una frecuencia aproximada de 15 kHz. Para el funcionamiento de este transformador es necesario un circuito capaz de entregar la frecuencia de operación necesaria.

⁴ S. Korenev⁶, and I. Korenev, "COMPACT PULSED OZONE GENERATOR", STERIS Corporation, 2500 Commerce Drive, Libertyville, IL 60048, USA

Figura 4. Transformador tipo Flyback.



3.2. CIRCUITO DRIVER.

En la literatura se encuentran diversos circuitos que permiten generar una señal pulsante como la que se necesita para alimentar el transformador flyback, de los cuales se compararon los que cumplían con las necesidades básicas para este diseño y se eligieron los que mejor se adaptaban a el, buscando siempre el menor costo y tamaño para su fácil movilidad.

Se utilizó un driver para flyback que permite obtener la frecuencia requerida para alimentar el transformador, usando una configuración básica de un convertor DC-DC de aislamiento galvánico. Este circuito se compone básicamente de un elemento oscilador que produce una señal pulsante, la cual alimenta la etapa de amplificación, luego se entrega dicha tensión a un transistor MOSFET funcionando como un interruptor de alta frecuencia y finalmente el transformador flyback. Este circuito se toma con el objetivo principal de reducir los costos de implementación, pero sin descuidar los requerimientos mínimos para la producción del ozono. El circuito está compuesto por un timer LM555, un MOSFET de potencia IRFP450, un regulador LM7812 y una etapa de potencia compuesto por un transistor 2N3904 y un transistor 2N3906⁵.

⁵ Nader Barroom, Glenn Isaiah Stanley, **Design of High Voltage Low Power Supply Device**, Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering 3(1): 6-12, 2015, <http://www.hrpub.org> , DOI: 10.13189/ujeee.2015.030102

Figura 5. Esquema del driver para flyback.

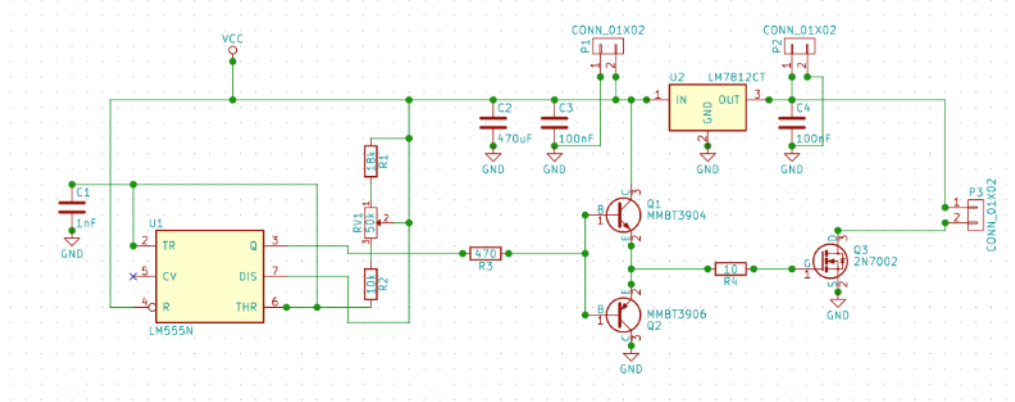
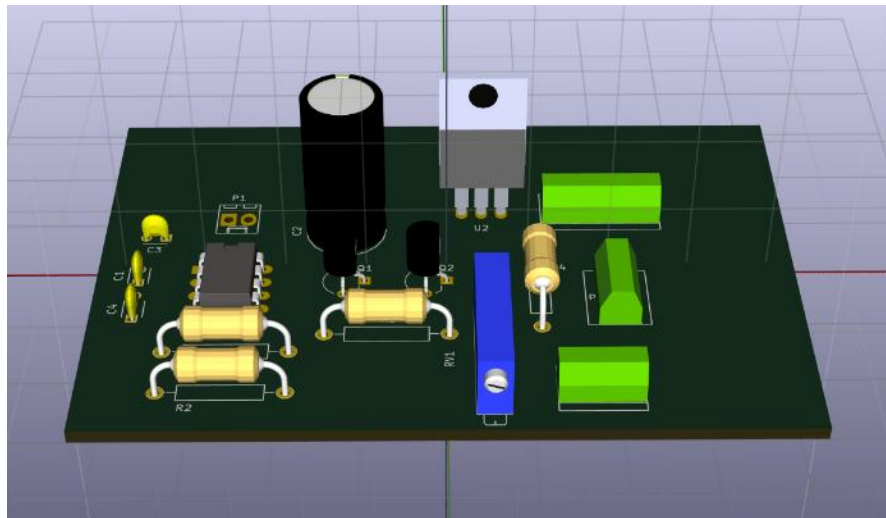


Figura 6. PCB driver flyback.



3.2.1. Descripción del funcionamiento del circuito.

En la primera etapa del circuito se utilizó el regulador LM7812 el cual garantiza una entrada estable en todo el ciclo de operación para la etapa lógica del driver. La etapa lógica está compuesta por un LM555 diseñado para oscilar en un rango de frecuencia variable establecido por un trimmer de 50 K Ω . A continuación se encuentra una etapa de adecuación compuesta por los transistores 2N3904 y 2N3906, esta etapa tiene como objetivo proporcionar la tensión necesaria para disparar el MOSFET de la etapa de potencia.

3.3. CELDAS GENERADORAS.

Se utilizaron reactores cilíndricos concéntricos, formados por un aislante y dos elementos metálicos los cuales están conformados por tubería PVC eléctrica como aislante y mallas de acero que actúan como electrodos que permiten aumentar los puntos de producción de ozono por centímetro cuadrado en comparación con una lámina de acero de las mismas dimensiones. El material aislante escogido es el PVC debido a su durabilidad y bajo costo comparado con otras alternativas que se encuentran en el mercado como vidrio pírex o mica. Como alternativa la mica tiene una resistencia mecánica aceptable con una alta constante dieléctrica sin embargo no es fácil de moldear en una geometría cilíndrica por otro lado el vidrio pírex permite ser moldeado en diferentes formas no obstante es mucho más frágil y susceptible a fracturas.

Figura 7. Celdas Generadoras de Ozono.



Los electrodos fueron fabricados en tres tamaños, $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{4}$ " y 1" para verificar la producción de ozono llegando a obtener un mejor funcionamiento con los electrodos de menor diámetro produciéndose una distribución del efecto corona más homogénea sobre la superficie del dieléctrico y sin producirse algún arco en forma de hilo como se daba en la tubería de mayor diámetro.

La selección de una celda concéntrica viene dada por la relación entre la producción de ozono y la temperatura que esta alcanza durante el régimen de operación. Una celda concéntrica no produce la misma concentración de ozono que una celda plana en cambio permite un flujo de aire abundante, posibilitando

que se mantenga una baja temperatura alargando la vida útil del modelo funcional, disminuyendo la degradación del ozono y simplificando el sistema de refrigeración.

3.4. ALIMENTACION.

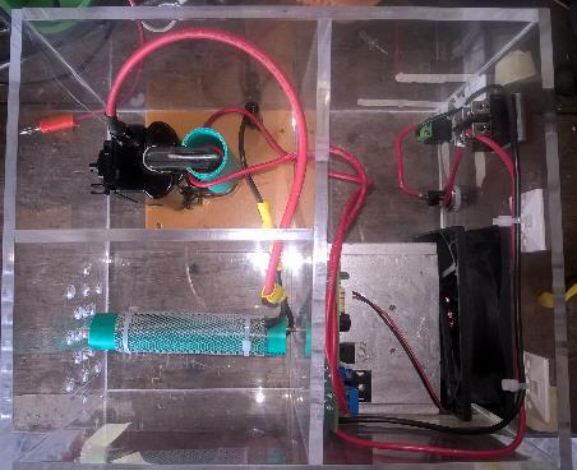
Para las pruebas el modelo funcional fue alimentado a una tensión de 12 V y una corriente de 3 A suministrado por un adaptador AC-DC. Este adaptador garantiza una tensión y una corriente constantes, condición necesaria para la operación del modelo funcional manteniendo al mínimo el peso y el tamaño.

3.5. MODELO FUNCIONAL COMPLETO.

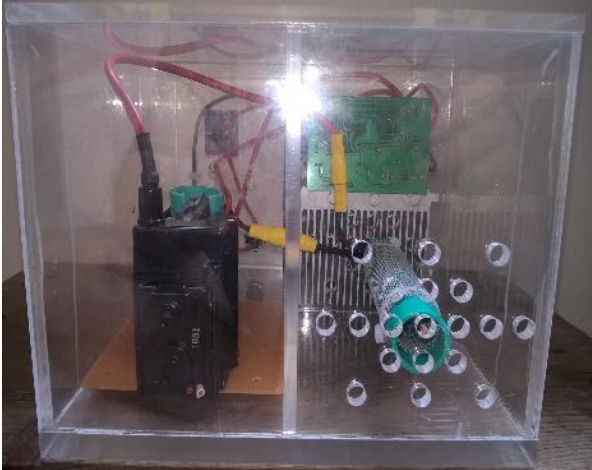
El modelo funcional final está compuesto por una caja que contiene todos los elementos del generador de ozono, debidamente separados buscando que estén lo mas aisladamente posible uno del otro. Adicionalmente cuenta con un fusible para protección de sobre corriente, un interruptor y la conexión para el adaptador. En la zona alrededor de la celda como protección adicional se encuentran instaladas unos paneles de mica para evitar descargas accidentales hacia el usuario.

En el anexo B se puede observar la capa de cobre con las pistas impresas en la PCB del modelo funcional.

Figura 8. Modelo funcional Final. Vista superior (a). Vista frontal (b). Vista lateral (c)



(a)



(b)



(c)

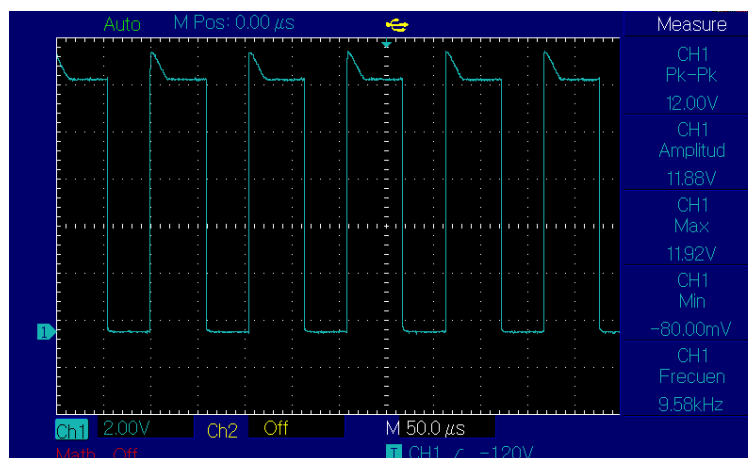
4. PRUEBAS.

Para realizar las pruebas se tuvo en cuenta la relación del efecto corona producido en la celda, así como de la corriente de alimentación y la frecuencia. Al aumentar la frecuencia se observó una relación directa de esta con el efecto corona que se aprecia en la celda y por ende en la producción de ozono; sin embargo, al aumentar la frecuencia el consumo de corriente para mantener una reacción estable por toda la celda aumenta.

4.1. FRECUENCIA DE OPERACION.

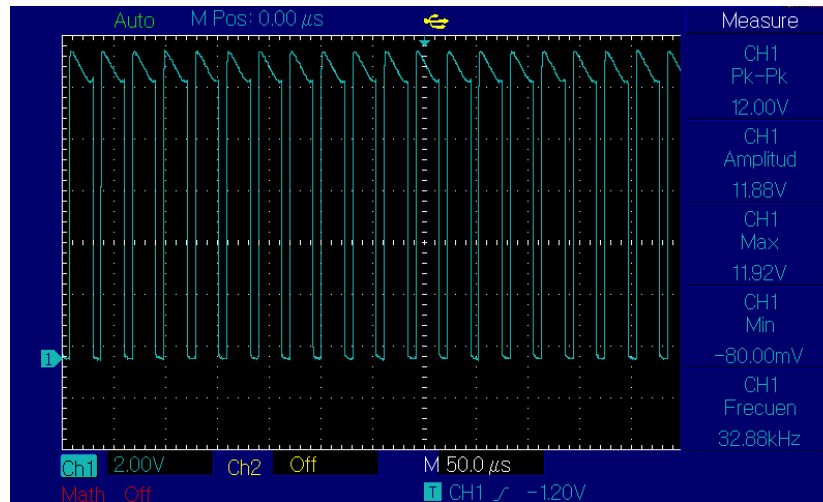
Para obtener la frecuencia de operación necesaria se empleó un LM555 en su configuración de multivibrador astable, con una resistencia variable para poder variar su frecuencia. Al conectarle el osciloscopio se observó que la frecuencia de operación se encuentra entre 9,58 kHz y 32,88 kHz concordando con lo que se encontró en la literatura y confirmando dicha información.⁶

Figura 9. Salida del LM555 a frecuencia mínima.



⁶ R.S.Somalwar , Vikrant U, Janekar , Bhushan Umate, "Advance Method for Calculating Ozone Chamber Parameters", The National Conference on, "Electrical Engineering Research & Advancement"(EERA-2014) 33 Page DES's College of Engineering & Technology, Dhamangaon Rly, Distt.Amravati (M.S.)-India

Figura 10. Salida del LM555 a frecuencia máxima.

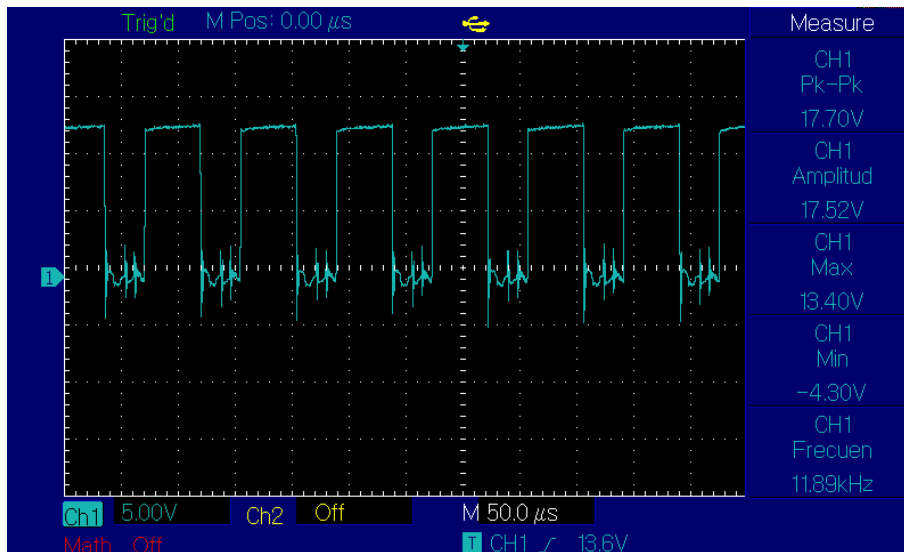


Si bien al conectar la celda y aplicarle un valor de frecuencia dentro de estos rangos se produce el efecto corona, por encima de los 11,82 [kHz] hacen que el efecto sea inestable con la corriente de operación de 3 A. Adicionalmente al aumentar la frecuencia se generan arcos de tensión no deseados los cuales inhiben la producción de ozono.

4.2. OPERACIÓN DEL CIRCUITO DRIVER.

Con los parámetros de alimentación y frecuencia óptimos se procedió a hacer mediciones sobre la celda generadora. Se realizaron pruebas de 45 minutos de duración con el modelo funcional trabajando a esta frecuencia optima, en las cuales se vigiló la temperatura de operación de cada uno de los elementos del circuito pudiendo constatar que las mayores pérdidas térmicas se dan en el MOSFET (IRFP450) debido a la conmutación a alta frecuencia y a la corriente que fluye por este, por lo cual se hizo necesario que este elemento cuente con una disipación adecuada durante su tiempo de operación.

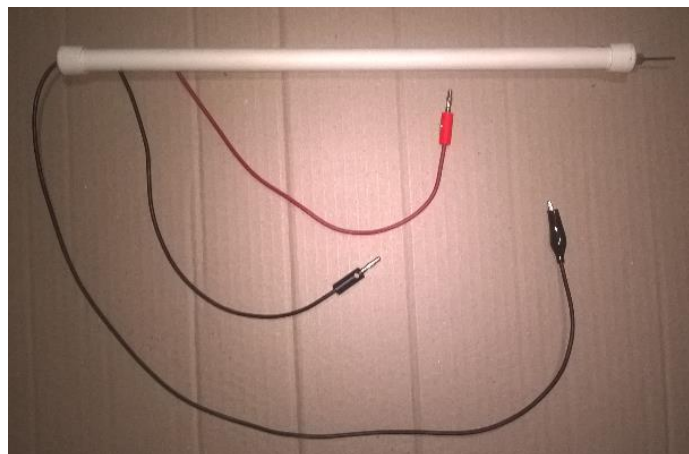
Figura 11. Salida del LM555 a frecuencia de operación.



4.3. OPERACIÓN DE LA CELDA GENERADORA DE OZONO.

Para tomar las mediciones eléctricas sobre la celda, fue necesaria la implementación de un divisor de tensión con un factor de reducción de tensión de 1000 a 1 utilizando resistencias de alto valor para evitar efectos de ruido a la hora de tomar las mediciones, así como para evitar que altas corrientes fluyeran hacia el equipo de medición.

Figura 12. Sonda de alta tensión.



Con la sonda conectada a un osciloscopio se pudieron tomar datos aproximados

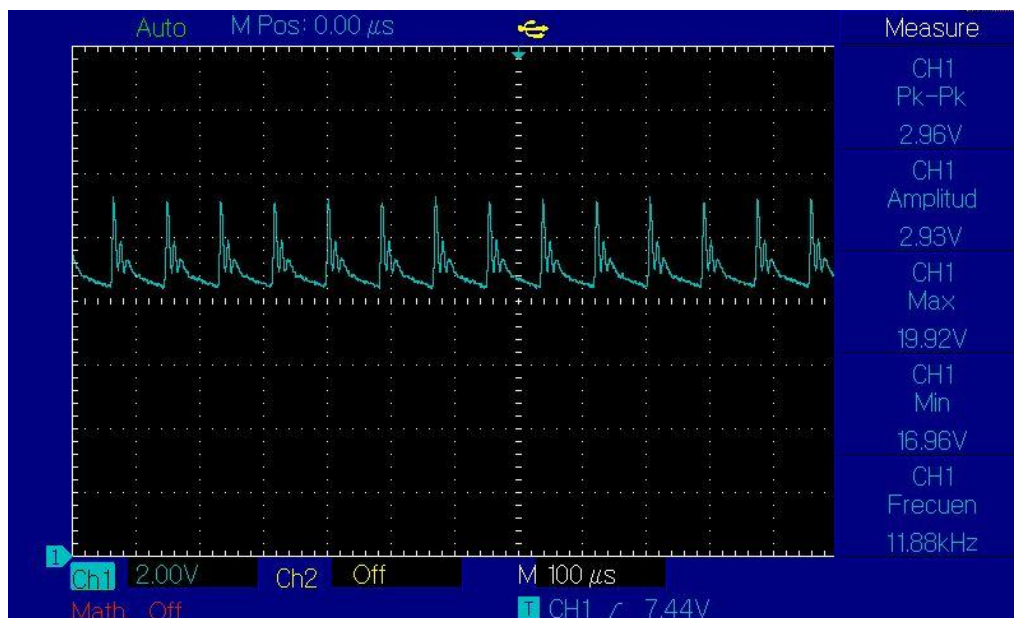
de los parámetros de operación de la celda.

Figura 13. Conexión de la zona al circuito.



La forma de la señal obtenida en la celda es de la siguiente forma

Figura 14. Señal de operación de la celda generadora de ozono.



Con unos parámetros de operación mostrado a continuación:

Figura15. Parámetros de operación de la celda generadora de ozono.



Figura 16. Parámetros de operación de la celda generadora de ozono.



Para observar el efecto corona en la celda se tomaron fotografías en oscuridad y se obtuvieron las siguientes imágenes de operación de la celda:

Figura 17. Efecto corona en la celda. Vista superior.

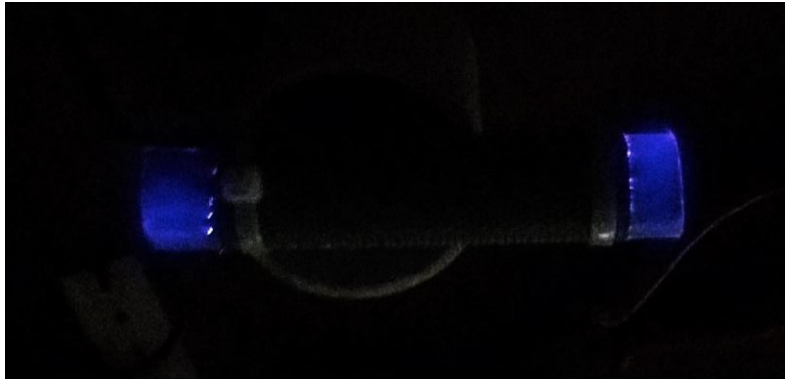


Figura 18. Efecto corona en la celda. Vista Frontal.



4.4 PRUEBAS TERMOGRAFICAS.

Con el objetivo de buscar puntos calientes y de esta forma el eslabón más débil del modelo funcional por efecto de la temperatura se usó una cámara termografica Fluke Ti32 en la escuela de la E3T.

Se encontró que el MOSFET IRFP450 produce la mayor cantidad de pérdidas de energía térmica como se observa en la figura 19. El transformador Flyback presenta un leve incremento de temperatura alrededor de 3 grados centigrados presentado en la figura 20, mientras que la celda en la figura 21 se mantiene a temperatura ambiente.

Figura 19. Fotografía Termografica 1. MOSFET IRFP450

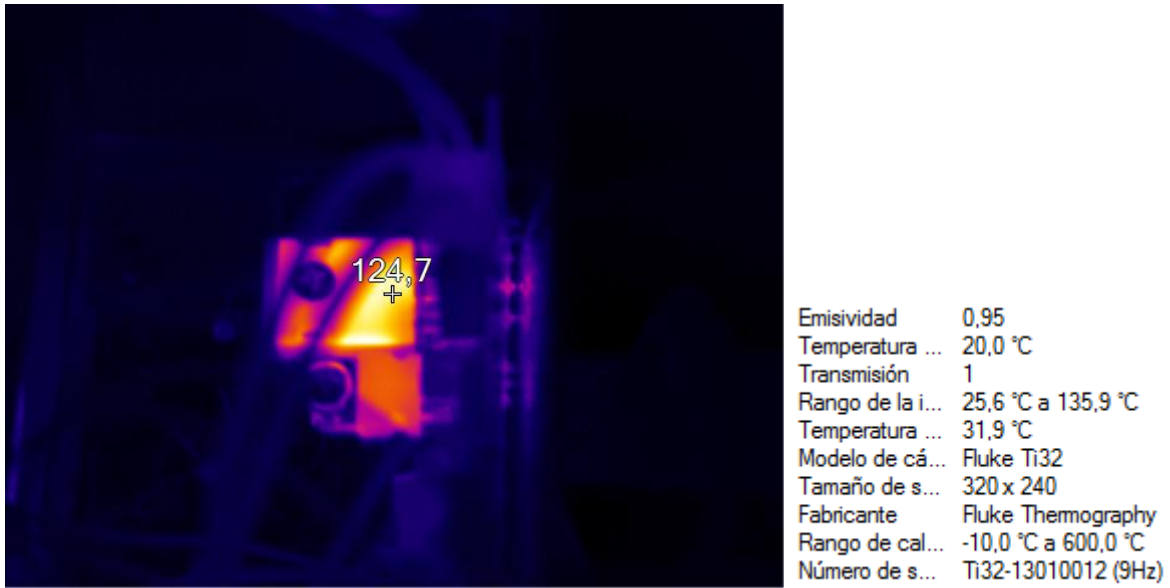


Figura 20. Fotografía Termografica 2. Flyback.

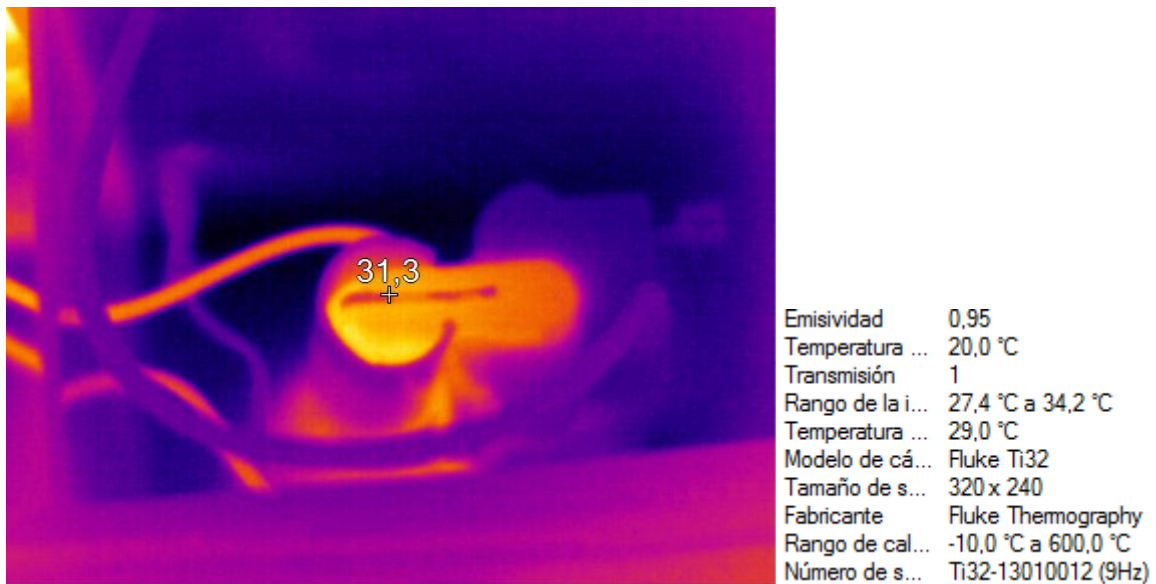
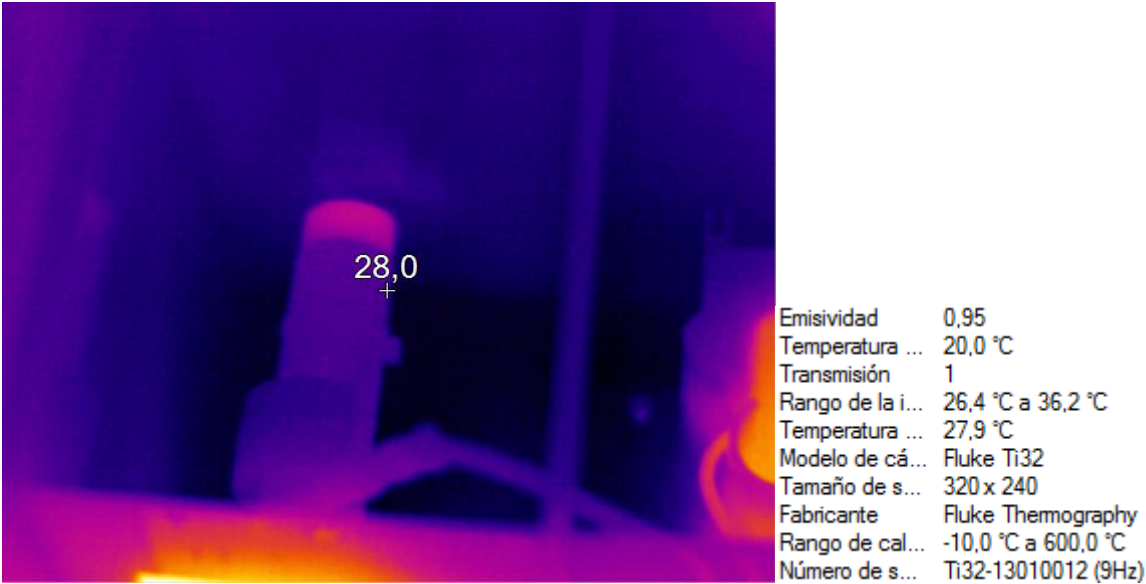


Figura 21. Fotografía Termografica 3. Celda Generadora.



4.5. MEDICIONES DE PARÁMETROS DEL MODELO FUNCIONAL.

4.5.1. Eficiencia Eléctrica.

Los cálculos de eficiencia se muestran a continuación:

$$\text{EFICIENCIA} = \frac{\text{Potencia Promedio de salida}}{\text{Potencia RMS de salida}} * 100\%$$

$$\text{Potencia Promedio de salida} = V_{\text{avg}} * I_{\text{avg}} = 17640 * 0,33$$

$$\text{Potencia RMS de salida} = V_{\text{rms}} * I_{\text{rms}} = 17670 * 0,35$$

$$\text{EFICIENCIA} = \frac{5821,2}{6184,5} * 100\% = 94,12\%$$

4.5.2. Medición de Ozono.

La medición de ozono se llevó a cabo por medio de uno de los equipos de la **CDMB** (Corporación De la Defensa de la Meseta de Bucaramanga) que permitió hacer un promedio de generación de ozono en el intervalo de una hora. Este equipo analítico muestra por medio de un display en tiempo real el valor que detecta en el medio y almacena dicho valor cada hora, por tal motivo no se pudieron tomar más puntos que permitieran el seguimiento detallado, debido al costo y tiempo que conlleva elaborar la prueba. A continuación, podemos observar imágenes con los valores obtenidos, en la figura 22 se puede observar los valores medidos en ciertos puntos de la prueba, mostrando el dato mínimo y máximo que genera nuestro modelo, por otro lado la figura 23 muestra el valor medido en el momento que se apaga nuestro generador, permitiendo ver la medida de ozono que se encuentra en el ambiente. En el anexo A se muestra las características del equipo utilizado por la CDMB.

Figura 22. Valores de ozono medidos con equipo cdm.

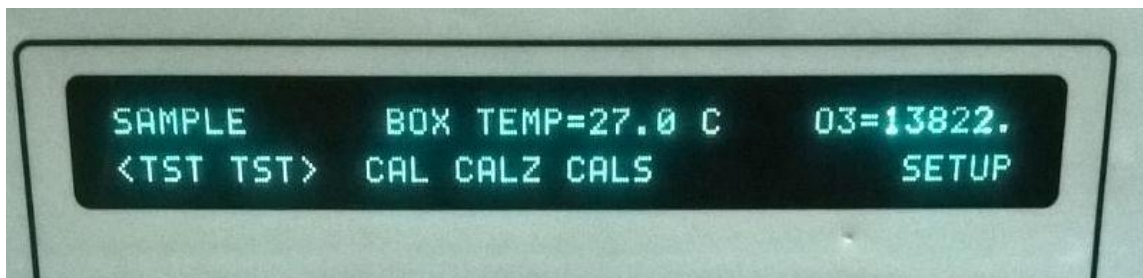


Figura 23. Valor de ozono en el ambiente medido con equipo cdm.



Como se puede observar en las imágenes el rango de generación obtenido con el modelo funcional está comprendido entre los 13000 ppb (Figura 1) hasta los 15000 ppb (Figura 1), estos valores se encuentran por fuera del umbral aconsejado para que una persona esté expuesta en una jornada de ocho horas, por tal razón se debería utilizar en intervalos cortos para evitar afectaciones de la salud en las personas que utilicen el generador.

5. COSTOS

El prototipo pese a ser un modelo funcional tiene un costo bajo, siendo este costo definitivamente menor al de equipos comerciales con la característica de que su producción de ozono es mucho mayor.

Tabla 2. Costos del Modelo funcional.

| LISTA DE MATERIALES GENERADOR DE OZONO | | | | | |
|--|------------------|--------|----------|----------|----------|
| ITEM | ELEMENTO | UNIDAD | CANTIDAD | COSTO | TOTAL |
| 1 | LM555 | EA | 1 | 700 | 700 |
| 2 | LM7812 | EA | 1 | 700 | 700 |
| 3 | 2N3904 | EA | 1 | 200 | 200 |
| 4 | 2N3906 | EA | 1 | 200 | 200 |
| 5 | IRFP450 | EA | 1 | 7,000 | 7,000 |
| 6 | C(100Nf) | EA | 2 | 100 | 200 |
| 7 | C(1Nf) | EA | 1 | 100 | 100 |
| 8 | C(470Uf) | EA | 1 | 500 | 500 |
| 9 | R(10K) | EA | 1 | 60 | 60 |
| 10 | R(18K) | EA | 1 | 60 | 60 |
| 11 | R(470) | EA | 1 | 60 | 60 |
| 12 | R(10) | EA | 1 | 60 | 60 |
| 13 | TRIMER 50K | EA | 1 | 1,500 | 1,500 |
| 14 | CONECTOR 2 PINES | EA | 4 | 400 | 1,600 |
| 15 | FLYBACK | EA | 1 | 15,000 | 15,000 |
| 16 | PCB | EA | 1 | *15,000 | *15,000 |
| 17 | TUBERIA ½" | MTS | 3 | 6,000 | 1,000 |
| 18 | MALLA ACERO | EA | 1 | 20,000 | 2,500 |
| 19 | VENTILADOR | EA | 1 | 8,000 | 8,000 |
| 20 | CARGADOR | EA | 1 | 25,000 | 25,000 |
| 21 | DISIPADOR | EA | 1 | 12,000 | 12,000 |
| 22 | CAJA | EA | 1 | **80,000 | **80,000 |
| TOTAL | | | 171,440 | | |

*costo de la pcb con elaboración al por mayor en china.

** costo de la caja haciendo un rediseño para bajar costos de producción y material.

6. CONCLUSIONES

- Se alcanzó satisfactoriamente el objetivo de construir un generador de ozono de bajo costo y fácil movilidad.
- Se comprobó que el PVC puede ser utilizado como dieléctrico para la celda además es un material fácil de adquirir y de manipular; tiene como desventajas que no es resistente a la oxidación producida por el ozono a largo plazo.
- Se logro implementar un ventilador como sistema de enfriamiento. Así mismo proporciona el aire de alimentación para la celda, todo esto con el fin de reducir los costos de fabricación.
- Se obtuvo una frecuencia de operación optima que permite un efecto corona estable. De igual manera se observo que al variar el parámetro de corriente de alimentación es necesario ajustar la frecuencia para lograr el punto de operación apropiado.

7. RECOMENDACIONES

- En trabajos futuros se debe buscar el punto de frecuencia adecuado para incrementar la corriente de alimentación.
- Se debe mantener baja la temperatura de todos los elementos para garantizar una vida útil mayor y una producción estable de ozono.
- En trabajos posteriores se puede evaluar el efecto en la generación de ozono utilizando aire seco u oxígeno puro en contraposición al aire ambiental.
- Se recomienda mejorar el material de la celda para prolongar la duración del prototipo.

BIBLIOGRAFIA

GUZEL-seydim,zeynep; GREENE, Annel y SEYDIM, A.C. Use of ozone in the food industry. En: LWT-Food Science and Technology. Abril, 2004. Vol. 37, No. 4, 454 p.

KORENEV S, and KORENEV I. compact pulsed ozone generator. steris Corporation, 2500 Commerce Drive, Libertyvik. IL 60048, USA.

W.H. TAY, S.L. YAP & C.S. WONG, Electrical Characteristics and Modeling of a Filamentary Dielectric Barrier Discharge in Atmospheric Air. Sains Malaysiana43(4)(2014):583–594.

CASTAÑEDA JIMÉNEZ Amparo Carolina. procesos de oxidación avanzada aplicados en el tratamiento de aguas de la industria del petróleo. Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito” especialización en recursos hidráulicos y medio ambiente 2014.

BARSOUM Nader , STANLEY Glenn Isaiah, Design of High Voltage Low Power Supply Device, Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering 3(1): 6-12, 2015, <http://www.hrpub.org> , DOI: 10.13189/ujeee.2015.030102

SOMALWAR R.S. , Vikrant U, Janekar , Bhushan Umate, “Advance Method for Calculating Ozone Chamber Parameters”, The National Conference on, “Electrical Engineering Research & Advancement”(EERA-2014) 33 Page DES’s College of Engineering & Technology, Dhamangaon Rly, Distt.Amravati (M.S.)-India

CARDONA FRANCO C L, LOPERA S, MEJÍA J, CORTEZ F. Heavy Oil Upgrading and Enhanced Recovery in a Continuous Steam Injection Process Assisted by Nanoparticulated Catalysts, SPE, 1–16. 2016

FELIX, J. J, Bremner, C., Brough, B., Baker, A. La importancia del petróleo pesado. Oilfield Review, 18(2), 38–59. 2006.

CURTIS, C., Guzmán-garcía, A., Huggins, C., Knauer, L., Minner, M., & Rough, H. Yacimientos de petróleo pesado. Oilfield Review, 12(6), 32 – 55 2003.

EL-SAYED Manar Abdel, Crude oil emulsions-composition stability and characterization, 2012, Intech, Croacia.

FONSECA, D., & PEREIRA, J. C. Caracterización morfológica de películas de asfaltenos sobre sustratos de oro mediante microscopía electrónica de barrido, acta microscópica 22(3), 273–277, 2013.

BORGES B, DEL CARPIO E, Caracterización morfológica y espectroscópica de asfaltenos provenientes de diferentes crudos, *Rev. LatinAm. Metal. Mat.*; 34 (2): 218-229, 2014

SHEU E, Petroleum Asphaltene s Properties, Characterization, and Issues. *Energy & Fuels*, 4(5), 74–82. 2002.

Página 33 de 37

HOSSEINI A, ZARE E, AYATOLLAHI S, VARGAS F, CHAPMAN W, KOSTARELOS K, Taghikhani V. Electrokinetic behavior of asphaltene particles. *FUEL*, 178, 234–242, 2016.

ANDERSEN SI, STENBY EI. Thermodynamics of asphaltene precipitation and dissolution investigation of temperature and solvent effects, *FUEL*, 14, 261-287, 1996

JOSHI N, MULLINS O, JAMALUDDIN A, Creek J, Asphaltene Precipitation from Live Crude Oil, *Energy & Fuels*, 15, 979-986, 2001

DORYANI H, MALAYERI M, Riazi M, Visualization of asphaltene precipitation and deposition in a uniformly patterned glass micromodel, *FUEL*, 182, 613–622, 2016

LEONTARITIS K, MANSOORI G. Asphaltene flocculation during oil production and processing: A thermodynamic colloidal model. *SPE.16258*, 4–6. 1987

SUBRAMANIAN, S, SIMON S, SJÖBLOM J. Asphaltene Precipitation Models: A Review, *Journal of Dispersion Science and Technology* 2015

VICTOROV AI, FIROOZABADI A, Thermodynamic micellization model of asphaltene precipitation from petroleum fluids, *AIChE J*, 42, 1753-1764, 1996

HANS Höft, HUISKAMP Tom, MANFRED Kettlitz, and A. J. M. (Guus) Pemen, Visualization of a Coaxial Dielectric Barrier Discharge Driven by a Sub-ns Rising High-Voltage Pulse and Its Reflections, *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, VOL. 42, NO. 10, OCTOBER 2014

PAL U N, KUMAR M, TYAGI MS, BL Meena, H Khatun and A K Sharma, Discharge analysis and electrical modeling for the development of efficient dielectric barrier discharge, *Journal of Physics: Conference Series* 208 (2010) 012142

ANEXOS

ANEXO A

HOJAS DE DATOS ELEMENTOS DEL GENERADOR

ESPECIFICACIONES TECNICAS ANALIZADOR DE OZONO TELEDYNE 400A

| | |
|--------------------------|--|
| Ranges | User selectable to any full scale range from 100 ppb to 10 ppm |
| Measurement Units | ppb, ppm, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (user selectable) |
| Zero Noise | < 0.3 ppb RMS per EPA definition |
| Span Noise | < 0.5% of reading RMS per EPA definition (above 100 ppb) |
| Lower Detectable Limit | < 0.6 ppb per EPA definition |
| Zero Drift (24 hours)** | < 1.0 ppb |
| Zero Drift (7 days)** | < 1.0 ppb |
| Span Drift (24 hours)** | < 1% of reading |
| Span Drift (7 days)** | < 1% of reading |
| Linearity | Better than 1% full scale |
| Precision* | 0.5% reading |
| Lag Time | <10 sec per EPA Definition |
| Rise/Fall Time | <20 sec to 95% per EPA Definition |
| Sample Flow Rate | 800 scc/min. \pm 10% |
| Temperature Range* | 5 - 40°C |
| Humidity Range | 10-90% RH, Non-Condensing |
| Temp Coefficient | < 0.05 % per °C |
| Voltage Coefficient | < 0.05 % per V |
| Dimensions (H x W x D) | 7" x 17" x 24" (178 mm x 432 mm x 610 mm) |
| Weight | 37 lb (17 kg) standard unit 39 lb (17.6 kg) w/IZS |
| Power | 110V/60 Hz, 220V/50 Hz, 240 V/50 Hz 250 watts 230 V~, 50 Hz, 2.5A |
| Environmental Conditions | Installation Category (Overvoltage Category) II Pollution Degree 2, 2000m maximum altitude |
| Recorder/DAS Output | \pm 100 mV, \pm 1 V, \pm 5 V, \pm 10 V (Bi-Polar), 0-20 or 4-20 mA current loop |
| Analog Output Resolution | 1 part in 1024 of selected full-scale voltage |
| Status | 12 Status outputs from opto-isolators |

* As defined by the USEPA

** at constant temperature and voltage

HOJA DE DATOS TRANSISTOR IRFP450



IRFP450

N - CHANNEL 500V - 0.33Ω - 14A - TO-247 PowerMESH™ MOSFET

| TYPE | V _{DSS} | R _{DS(on)} | I _D |
|---------|------------------|---------------------|----------------|
| IRFP450 | 500 V | < 0.4 Ω | 14 A |

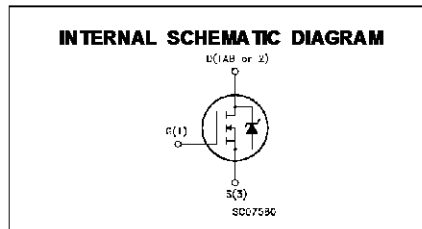
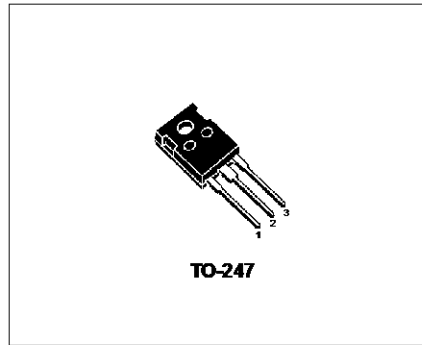
- TYPICAL R_{DS(on)} = 0.33 Ω
- EXTREMELY HIGH dv/dt CAPABILITY
- 100% AVALANCHE TESTED
- VERY LOW INTRINSIC CAPACITANCES
- GATE CHARGE MINIMIZED

DESCRIPTION

This power MOSFET is designed using the company's consolidated strip layout-based MESH OVERLAY™ process. This technology matches and improves the performances compared with standard parts from various sources.

APPLICATIONS

- HIGH CURRENT SWITCHING
- UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY (UPS)
- DC/DC CONVERTERS FOR TELECOM, INDUSTRIAL, AND LIGHTING EQUIPMENT.



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

| Symbol | Parameter | Value | Unit |
|---------------------|---|------------|------|
| V _{DS} | Drain-source Voltage (V _{GS} = 0) | 500 | V |
| V _{DGR} | Drain- gate Voltage (R _{GS} = 20 kΩ) | 500 | V |
| V _{GS} | Gate-source Voltage | ± 20 | V |
| I _D | Drain Current (continuous) at T _c = 25 °C | 14 | A |
| I _D | Drain Current (continuous) at T _c = 100 °C | 8.7 | A |
| I _{DM} (*) | Drain Current (pulsed) | 56 | A |
| P _{tot} | Total Dissipation at T _c = 25 °C | 190 | W |
| | Derating Factor | 1.5 | W/°C |
| dv/dt(1) | Peak Diode Recovery voltage slope | 3.5 | V/ns |
| T _{stg} | Storage Temperature | -65 to 150 | °C |
| T _J | Max. Operating Junction Temperature | 150 | °C |

(*) Pulse width limited by safe operating area

(1) I_{DM} ≤ 14 A, di/dt ≤ 130 A/μs, V_{DD} ≤ V_{DRPSS}, T_J ≤ T_{JMAX}

ANEXO B

CIRCUITO IMPRESO (PCB)

