

**TRATAMIENTO DE ACEITE DIELECTRICO RESIDUAL EN LA EMPRESA  
BIOLUBRICANTES S.A.S, EMPLEANDO TIERRAS DE BLANQUEO Y MEJORADOR  
DE INDICE DE VISCOSIDAD (MIV), PARA SU APLICACIÓN COMO BASE  
LUBRICANTE EN MOTORES DE BAJO RENDIMIENTO**

**Jeferson Alexander Romero Ferreira**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA  
PAMPLONA, COLOMBIA  
2020

**TRATAMIENTO DE ACEITE DIELECTRICO RESIDUAL EN LA EMPRESA  
BIOLUBRICANTES S.A.S, EMPLEANDO TIERRAS DE BLANQUEO Y MEJORADOR  
DE INDICE DE VISCOSIDAD (MIV), PARA SU APLICACIÓN COMO BASE  
LUBRICANTE EN MOTORES DE BAJO RENDIMIENTO**

**Jeferson Alexander Romero Ferreira**

Trabajo de grado para optar por el título de:  
**Ingeniero Químico**

Director:

Dra. en Ing. Química, Ana María Rosso Cerón



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA  
PAMPLONA, COLOMBIA

2020

**DEDICATORIA**

*A mi madre Marisol Ferreira, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias por ser mi motivación, darme tanta confianza y ser mi mayor apoyo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios por guiarme y brindarme sabiduría a lo largo de la vida, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.*

*A mi familia mis padres Marisol y José Benito, A mis hermanas Laura y Nathalia por su compañía, por su apoyo incondicional este logro es de ustedes.*

*A la empresa BIOLUBRICANTES S.A.S por permitirme afianzar mis conocimientos en tan grandiosa empresa, por hacer posible la realización de mi pasantía profesional allí y poder ganar experiencia en el mundo laboral, y mis más sinceras gratitudes al personal de producción de esta empresa por el tiempo brindado en explicaciones e informaciones.*

*A la Universidad de Pamplona y a los docentes del programa de Ingeniería Química, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión y por ultimo a la Doctora Ana María Rosso Cerón, por orientarme en la elaboración del presente trabajo.*

*Gracias.*

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	12
2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACION.....	13
3. OBJETIVOS.....	14
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
4. MARCO TEÓRICO.....	15
4.1 ACEITE DIELECTRICO .....	15
4.1.1. TIPOS DE ACEITE .....	16
4.1.1.1. Bifenilos de policloruro (PCB) .....	16
4.1.1.2. Aceites siliconados.....	16
4.1.1.3. Aceite mineral .....	16
4.1.1.4. Aceite vegetal.....	16
4.2. TIERRAS DE BLANQUEO .....	17
4.3. MEJORADOR DE ÍNDICE DE VISCOSIDAD (MIV).....	17
4.4. PRUEBAS PARA ACEITE DIELECTRICO REGENERADO .....	18
4.4.1. Examen visual .....	18
4.4.2. Color.....	18
4.4.3. Densidad .....	19
4.4.4. Viscosidad .....	19
5. METODOLOGÍA .....	20
5.1. Etapa 1. Regeneración del aceite .....	20
5.1.1. Preparación de la muestra.....	20

5.1.2.	Determinación de las variables que influyen en la regeneración de aceite dieléctrico con tierras de blanqueo.....	20
5.1.3.	Evaluación de las condiciones más adecuadas de tierra de blanqueo para regenerar el aceite dieléctrico residual. ....	20
5.2.	Etapa 2. Adición del mejorador de la viscosidad.....	21
5.2.1.	Determinación de las variables que influyen en el proceso de mejora de viscosidad del aceite dieléctrico regenerado. ....	21
5.2.2.	Evaluación de las condiciones más adecuadas para mejorar la viscosidad del aceite dieléctrico regenerado. ....	22
6.	ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL PROYECTO.....	23
6.1.	Etapa 1: Regeneración de aceite .....	23
6.1.1.	Evaluación de las condiciones de tierra de blanqueo para regenerar el aceite dieléctrico residual .....	23
6.1.2.	Análisis de la densidad.....	23
6.1.2.1.	Efecto de la temperatura en la densidad .....	24
6.1.2.2.	Efecto de la relación tierra-aceite en la densidad.....	24
6.1.2.3.	Efecto del tiempo de contacto en la densidad.....	25
6.1.3.	Análisis de color.....	25
6.1.3.1.	Efecto de la temperatura en el color .....	26
6.1.3.2.	Efecto de la relación tierra-aceite el color .....	26
6.1.3.3.	Efecto del tiempo de contacto en el color.....	26
6.2.	CONDICIONES DE COLOR Y DENSIDAD DE ACEITE DIELECTRICO REGENERADO .....	28
6.3.	Etapa 2: Mejorador de índice de viscosidad del aceite dieléctrico .....	28
6.3.1.	Evaluación de las condiciones para mejorar la viscosidad del aceite dieléctrico regenerado. ....	28

6.3.1.1. Efecto de la relación Mejorador de Índice de Viscosidad-aceite en la viscosidad	29
6.3.1.2. Efecto de la temperatura y el tiempo de contacto en la viscosidad.....	30
6.4. CONDICIONES DE LA VISCOSIDAD EN EL ACEITE DIELECTRICO REGENERADO .....	31
7. CONCLUSIONES .....	32
8. RECOMENDACIONES.....	33
9. BIBLIOGRAFÍA.....	34
10. ANEXOS.....	37

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Niveles permisibles de contaminantes en aceites usados. ....	15
Tabla 2: Vida útil de aceite dieléctrico en función de su temperatura.....	15
Tabla 3. Valor aceptable e inaceptable de color de aceite dieléctrico regenerado .....	19
Tabla 4. Factores y Niveles del diseño experimental regeneración de aceite.....	21
Tabla 5. Factores y Niveles del diseño experimental Mejorador de Índice Viscosidad .....	22
Tabla 6. Resultados de análisis estadístico para la densidad (Análisis de varianza ANOVA) .....	23
Tabla 7. Resultados de análisis estadístico del color (Análisis de varianza ANOVA).....	25
Tabla 8. Resultados de análisis estadístico de la viscosidad (Análisis de varianza ANOVA).....	28



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cromatografía del aceite dieléctrico según su contaminación... ..	18
Figura 2: Superficie contorno de respuesta Tiempo vs Tierra a Temperatura=70 °C .....	24
Figura 3: Superficie de contorno de respuesta Temperatura vs Tierra a Tiempo=60 min .....	27
Figura 4: Superficie de contorno de respuesta Tiempo vs Tierra a Temperatura=70.....	27
Figura 5: Superficie contorno de respuesta Tiempo vs Temperatura a Tierra =7,5 m:v .....	27
Figura 6: Condiciones favorables de regeneración de aceite dieléctrico. ....	28
Figura 7: Superficie contorno de respuesta Temperatura vs Tierra-Aceite a Tiempo=210 min.....	30
Figura 8: Superficie contorno de respuesta Temperatura vs Tiempo a Tierra-Aceite =4,5.....	30
Figura 9: Condiciones favorables de regeneración de aceite dieléctrico.....	31

## RESUMEN

En este trabajo se tiene como objetivo mejorar las propiedades fisicoquímicas (color, viscosidad, densidad) del aceite dieléctrico residual en la empresa Biolubricantes S.A.S, empleando tierras de blanqueo y un mejorador de índice de viscosidad (MIV). Para tal fin, se realizó una etapa de regeneración del aceite empleando un diseño factorial  $2^3$  compuesto central rotatable + puntos centrales con replica, evaluando el efecto de la relación tierra: aceite, temperatura de activación y tiempo de contacto, midiendo color y densidad. Para la etapa 2, del mejoramiento del índice de viscosidad (MIV), se realizó el segundo diseño factorial  $2^3$  midiendo la viscosidad del aceite dieléctrico regenerado proveniente de la etapa 1 y evaluando el efecto de la relación MIV: aceite, temperatura de homogenización y tiempo de homogenización. Los resultados experimentales mostraron que todas las variables estudiadas tienen un efecto significativo sobre el color, densidad y viscosidad. Para la etapa 1 las mejores condiciones de color y densidad (2,5; 0,8621g/mL) corresponden a condiciones de: relación tierra:aceite 11,7 m:v, temperatura de activación 68,13°C y tiempo de contacto 70 min. Respecto a la etapa 2 la viscosidad deseada corresponde a (161 cSt) siguiendo la normativa SAE, a las siguientes condiciones: relación MIV:aceite 3,75 m:v, temperatura de homogenización 80°C y tiempo de homogenización 180 min a partir de las condiciones obtenidas se pudo tener una base lubricantes con propiedades mejoradas para la empresa Biolubricantes S.A.S.

**PALABRAS CLAVE:** Aceite dieléctrico residual, tierras de blanqueo, mejorador de viscosidad, color, densidad, viscosidad.

## **ABSTRACT**

The aim of this work is to improve the physicochemical properties (color, viscosity, density) of the residual dielectric oil in the company Biolubricantes S.A.S, using bleaching earths and a viscosity index improver (MIV). For this purpose, an oil regeneration stage was carried out using a factorial design  $2^3$  central rotary compound + central points with replica, evaluating the effect of the earth ratio: oil, activation temperature and contact time, measuring color and density. For the second stage of viscosity index improvement (MIV), the second factorial design  $2^3$  was made measuring the viscosity of the dielectric oil regenerated from stage 1 and evaluating the effect of the MIV ratio: oil, homogenization temperature and homogenization time. The experimental results showed that all the studied variables have a significant effect on the color, density and viscosity. For stage 1 the best conditions of color and density (2.5; 0.8621g/mL) correspond to conditions of: earth:oil ratio 11.7 m:v, activation temperature 68.13°C and contact time 70 min. Regarding the stage 2 the desired viscosity corresponds to (161 cSt) following the SAE standards, to the following conditions: MIV:oil ratio 3,75 m:v, homogenization temperature 80°C and homogenization time 180 min. From the obtained conditions it was possible to have a lubricant base with improved properties for the company Biolubricantes S.A.S.

**KEY WORDS:** Residual dielectric oil, bleaching earths, viscosity improver, color, density, viscosity

## 1. INTRODUCCIÓN

La empresa BIOLUBRICANTES S.A.S ubicada en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander tiene como propósito empresarial el aprovechamiento de todo tipo de aceites residuales o usados para la fabricación de combustibles industriales y aceites lubricantes a partir de eco-bases, disminuyendo en gran medida el impacto ambiental que estos desechos causan al planeta cuando no son dispuestos correctamente. Sus instalaciones cuentan con áreas de almacenamiento y tratamiento donde la principal materia prima son los aceites residual cárter y dieléctrico. En el proceso de regeneración de aceite dieléctrico en la empresa, la etapa de blanqueo puede procesar hasta 50 toneladas de aceite al año. Dentro objetivos de crecimiento establecidos para los próximos cinco años en la empresa se proyecta la expansión de la recolección de aceite dieléctrico residual en más departamentos de Colombia como lo son Santander, Cesar y Arauca.

El aceite dieléctrico está constituido por una mezcla de hidrocarburos y es obtenido por destilación del petróleo, seguido de un proceso de refinación para obtener las propiedades dieléctricas deseadas y otorgarle un alto grado de estabilidad química. Además, cumple distintas funciones en los transformadores y otros aparatos siendo las principales el aislamiento, la refrigeración por convección de las partes activas y la protección de los aislantes sólidos para que no absorban humedad del ambiente (Rebolledo, 2014).

En Colombia, la industria eléctrica utiliza aceite dieléctrico para el aislamiento térmico y eléctrico de los transformadores de potencia y así proteger y aumentar la vida útil de estos equipos. Años atrás fueron utilizados hidrocarburos clorados como aislantes de estos sistemas debido a su resistencia a la oxidación y alta rigidez dieléctrica, pero fueron reemplazados por los bifenilos policlorados, BPC (o PCB's por sus siglas en inglés), aceites del tipo vegetal y mineral, debido al alto peligro humano y ambiental que llevaba su utilización (Murillo & Marchena, 2006).

Cuando transcurre cierto tiempo de operación, el aceite contenido en los transformadores se desgasta, perdiendo sus propiedades como aislante. Debido a la reacción de oxidación entre los hidrocarburos y el oxígeno disuelto en el aceite (Marulanda & Bolaños, 2011). Los productos de oxidación se precipitan y se convierten en lodos que se depositan en los intersticios de la celulosa del papel, los devanados y radiadores del transformador causando el deterioro del equipo y su cambio inmediato teniendo en cuenta de su valor costoso en el mercado al ser un derivado del petróleo (Duran & Contreras, 2006).

Por consiguiente, la empresa Biolubricantes S.A.S regenera el aceite dieléctrico para así utilizarlo de nuevo en el transformador o en otros procesos industriales, donde las características del aceite regenerado son muy similares al aceite limpio y además su bajo costo de regeneración hacen viable este proceso (Delinchant, Mandil, & Wurtz, 2020). Por lo tanto, el presente trabajo se enfocó en el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas (color, viscosidad, densidad) del aceite dieléctrico residual, empleando tierras de blanqueo y un mejorador de índice de viscosidad (MIV), expresado en dos etapas la primera regeneración de aceite dieléctrico residual con tierras de blanqueo, encontrando las condiciones de valor mínimo de densidad y color, y finalmente para la segunda etapa adición de (MIV) donde se busca una viscosidad favorable para la empresa.

## 2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACION

Actualmente, crece la preocupación por el medio ambiente y su cuidado a nivel mundial, por esta razón la población mundial ha venido tratando en pro del desarrollo sostenible, por tanto, se ha venido trabando en cambiar productos contaminantes por otros de bajo impacto ambiental (Alexandra & Acosta, 2014). Asimismo, dado que el mundo ha sufrido transformaciones en la calidad ambiental, varios países buscan la preservación del medio ambiente, por esta razón la creación de normativas y leyes que controlen aspectos ambientales como la liberación de gases a la atmósfera, las descargas industriales sobre fuentes hídricas, y una de las más batalladas y difíciles de resolver como el uso, manejo y disposición final de sustancias tóxicas y peligrosas (Plutarco Edwin, 2009).

En Colombia es un reto el manejo de los residuos peligrosos, entre ellos los aceites lubricantes usados, debido a esto, una de las medidas es establecer los aspectos técnicos en las diferentes etapas de manejo (acopio, empaque, embalaje, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final), que de ser aplicados permitirán proteger la salud humana y el ambiente. El aceite lubricante usado que es recolectado de vehículos es un residuo peligroso, según lo establece el Anexo I, numerales 8 y 9 del Convenio de Basilea, el cual fue ratificado por Colombia mediante la Ley 253 de enero 9 de 1996. (Anexo 1 Normatividad); puesto que, es altamente tóxico y su uso inadecuado afecta no sólo a los seres vivos sino también al ambiente (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006). Según estudios desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental – EPA, el aceite lubricante usado que se quema bajo condiciones no controladas puede emitir más plomo al aire que cualquier otra fuente industrial (EPA, 2019).

Los aceites dieléctricos al ser un derivado de la industria petroquímica, son relativamente costosos, esto causa que el negocio de la regeneración sea de interés para el mercado energético, ya que la capacidad de los transformadores es de hasta 4.000 litros (Rymel, 2015). El aceite regenerado es de bajo costo comparado con el aceite dieléctrico limpio, además sus características son similares, por lo cual el proceso de regeneración es posiblemente viable (Óscar Beltrán, 2014). En Colombia el mercado de lubricantes genera más de US\$160 millones al año mueve el 30% de la rentabilidad de las empresas del sector automotriz (Dane, 2019).

El consumo mensual aproximado de lubricante es de 2.770.708 gal / mes; de los cuales el 13% de esta cifra (360.192 gal / mes) es suministrado por empresas diferentes a las grandes multinacionales y principales colombianas (Correa & Serna, 2017). El cual es un porcentaje en el que la empresa Biolubricantes S.A.S. tratará de incursionar, ya que, es una empresa dedicada principalmente al aprovechamiento de todo tipo de aceites residuales o usados para la fabricación de combustibles industriales y aceites lubricantes a partir de eco-bases, disminuyendo en gran medida, el impacto ambiental que estos desechos causan al planeta, cuando no son dispuestos correctamente (Biolubricantes s.a.s, 2020).

Por lo anterior, en este trabajo se planteó mejorar las propiedades fisicoquímicas de aceite dieléctrico residual recolectado por la empresa Biolubricantes S.A.S, donde se regeneró el aceite dieléctrico mejorando las propiedades del aceite para darle un valor agregado en pro de su posible aplicación como una base lubricante para motores de bajo rendimiento.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Mejorar las propiedades fisicoquímicas (color, viscosidad, densidad) del aceite dieléctrico residual en la empresa Biolubricantes S.A.S, empleando tierras de blanqueo y un mejorador de índice de viscosidad (MIV), para su aplicación como base lubricante en motores de bajo rendimiento.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar que variables influyen en la regeneración de aceite dieléctrico con tierras de blanqueo.
- Evaluar las condiciones más adecuadas de tierra de blanqueo para regenerar el aceite dieléctrico residual.
- Determinar las variables que influyen en el proceso de mejora de viscosidad del aceite dieléctrico regenerado.
- Evaluar las condiciones más adecuadas para mejorar la viscosidad del aceite dieléctrico regenerado.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 ACEITE DIELECTRICO

La industria eléctrica utiliza aceite dieléctrico, un derivado del petróleo el cual se utiliza en los sistemas de transmisión y distribución de energía de los transformadores como aislante y refrigerante (Alexandra & Acosta, 2014). El aceite mineral o aceite dieléctrico se compone principalmente de carbono e hidrógeno en moléculas que presentan diferentes estructuras (Parafinicos, Nafténicos y Aromáticos), además este poseen una baja viscosidad esto facilita la formación de corrientes de convección entre las fuentes de calor y las paredes frías, y específicamente en los conductos de refrigeración (Murillo & Marchena, 2006).

En Colombia fueron adoptados los valores máximos contaminantes establecidos en los aceites usados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), con base en ello, se establece que las concentraciones máximas permisibles de contaminantes en los aceites usados se rige por los parámetros de la Tabla 1(Camargo, 2016).

Tabla 1: Niveles permisibles de contaminantes en aceites usados.

SUSTANCIA	CONCENTRACIÓN MAXIMA PERMISIBLE (mg/kg.-ppm)
Bifenilos policlorados (PCBs)	50
Halógenos orgánicos totales	1000
Arsénico	5
Cadmio	2
Cromo	10
Plomo	100
Azufre	1,7% en peso

Fuente:(Camargo, 2016).

Debido al uso continuo del aceite dieléctrico se dan reacciones químicas dentro del transformador que generan compuestos ácidos, que se sitúan en forma de lodo y afectan su funcionamiento normal, lo que causa que dicho aceite deba regenerarse y ser tratado para eliminar las impurezas (Agudelo, 2012).

La vida útil de un aceite dieléctrico disminuye rápidamente, como se puede observar en la tabla 2, cuando se aumenta la temperatura de operación del transformador donde se utiliza. Es recomendable mantener temperaturas moderadas que no superen 60°C en los transformadores inmersos en aceite (Briones, 2005).

Tabla 2: Vida útil de aceite dieléctrico en función de su temperatura.

VIDA ÚTIL DEL ACEITE EN FUNCIÓN DE SU TEMPERATURA	
Temperatura (°C)	Vida útil del Aceite (Años)
60	20
70	10
80	5
90	2.5
100	1.2
110	0.5

Fuente: (Briones, 2005).

Algo preocupante en los aceites usados provenientes del sector eléctrico o que hayan sido mezclados con aceites dieléctricos de desecho es que pueden estar contaminados con bifenilos policlorados (PCBs), estos compuestos han sido utilizados en cientos de aplicaciones industriales y comerciales incluyendo la fabricación de fluidos dieléctricos, bases para la producción de tintas de impresión, pinturas, plásticos, cauchos, aceites para maquinas, sellantes, bombas de vacío, sistemas hidráulicos, compresores e intercambiadores de calor (Plutarco Edwin, 2009).

Cuando los aceites que contienen compuestos clorados se usan como combustible, se generan dioxinas y furanos presentando efectos negativos sobre el organismo debido a que estos compuestos tóxicos son estables hasta temperaturas cercanas a los 600°C. Las principales afectaciones a la salud humana son generadas por la exposición a estas sustancias se manifiestan a nivel de la piel presentando acné, hiperpigmentación, hipoqueratosis y a nivel del sistema nervioso (Garcia, 2012).

#### **4.1.1. TIPOS DE ACEITE**

##### **4.1.1.1. Bifenilos de policloruro (PCB)**

Los PCB son compuestos químicos formados por cloro, carbono e hidrógeno que fueron hechos a partir de los años 30, por la empresa Monsanto en Estados Unidos. El PCB es resistente al fuego, muy estable y poseen una alta rigidez dieléctrica. En 1976, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomendó la prohibición de la fabricación, comercialización y uso de los BPC a nivel mundial, debido a sus características tóxicas, sin embargo, en la actualidad hay transformadores, condensadores y, en menor grado, los termopermutadores y el equipo hidráulico que por su antigüedad los utilizan (Pnuma, 2002).

##### **4.1.1.2. Aceites siliconados**

Es un aceite a base de silicona dimetilica (Polímetro de Dimetilsiloxano nombre químico) actualmente uno de los compuestos menos peligrosos y uno de los mejores sustitutos de los PCB, debido a su capacidad de resistencia al fuego es mayor a la de aceites minerales y además es un refrigerante dieléctrico y no contaminante. Los fluidos sintéticos a base de silicona han sido utilizados en aplicaciones especiales donde se requiere un alto grado de seguridad y muy amplio tiempo de servicio (Alonso, 2013).

##### **4.1.1.3. Aceite mineral**

Es un derivado del petróleo, que se denomina aceite aislante, se encuentra en la mayoría de transformadores y se compone principalmente de carbono e hidrógeno en moléculas que presentan diferentes estructuras (Rebolledo, 2014).

##### **4.1.1.4. Aceite vegetal**

Es originado de semillas oleaginosas tiene características eléctricas similares al aceite en base mineral, con la ventaja de que su punto de combustión e inflamación es superior, posee una



alta rigidez dieléctrica, una gran estabilidad química, además de ser biodegradable y no es tóxico.

#### **4.2.TIERRAS DE BLANQUEO**

Desde la antigüedad el nombre tierras *fuller* fue dado a las tierras de blanqueo debido a un proceso de limpieza y relleno de algodón con arcilla y agua. Actualmente cualquier arcilla que tenga una capacidad de purificar y de decolorar en la refinación y purificación de aceite es llamada tierra de blanqueo (Briones, 2005). Estas tierras tienen una gran capacidad de adsorción de moléculas ácidas generadas durante el proceso de degradación del aceite dieléctrico además de que su composición consta de silicatos, alúmina, hierro, tierras alcalinas entre otras, es un compuesto muy poroso; es químicamente inerte y tiene baja conductividad de calor y electricidad; capaz de adsorber y retener gran cantidad de líquidos (Lazara & Diana, 2017).

Existen dos métodos de adsorción para la utilización de tierras, el método de contacto y el método de percolación. En el método de contacto se mezcla el aceite dieléctrico residual con las tierras de blanqueo teniendo en cuenta condiciones como la temperatura, velocidad de flujo, viscosidad del aceite y tiempo. Luego de llevarse a cabo la adsorción, la tierra es separada del aceite dieléctrico regenerado. En el método de percolación el aceite fluye a través de un lecho de tierra de blanqueo compactada, por presión teniendo en cuenta condiciones como granulometría del adsorbente, viscosidad del aceite, grosor y densidad de la columna de tierra de blanqueo (Agudelo, 2012).

#### **4.3.MEJORADOR DE ÍNDICE DE VISCOSIDAD (MIV)**

La viscosidad es una propiedad de la resistencia al movimiento, es una resistencia interna del fluido a moverse o fluir (Cengel & Boles, 2011). El índice de viscosidad se encarga de caracterizar la variación de viscosidad cinemática de un derivado de petróleo, donde la variación de la temperatura es inversamente proporcional a la variación de la viscosidad, por tanto, al aumentar la temperatura del lubricante disminuye su viscosidad (Jiménez, 2014).

Se debe tener en cuenta que un aceite lubricante no debe ser muy viscoso a bajas temperaturas para permitir un arranque fácil, pero tampoco debe ser muy poco viscoso a elevadas temperaturas para prevenir demasiada fricción y demasiado consumo de aceite. Debido a esto, el elevar el índice de viscosidad incrementa en el aceite mejor fluidez a temperatura ambiente, así el lubricante se desplaza con mayor velocidad a lugares donde se demanda su presencia. Para el caso de los motores este favorece su arranque en frío y a temperaturas altas la viscosidad no disminuye tan repentinamente a medida que aumenta, mejorando la protección de contacto del lubricante.

Finalmente, el aditivo o mejorador, es un polímero de alto peso molecular, el cual se dilata aumentando su tamaño a medida que la temperatura aumenta reduciendo la velocidad de movimiento de las moléculas en el seno del aceite (Lubricantes Wander, 2012).

#### 4.4.PRUEBAS PARA ACEITE DIELECTRICO REGENERADO

Las pruebas de diagnóstico realizadas al aceite dieléctrico forman parte de un grupo que permite la regeneración del aceite, cumpliendo los parámetros de aceptación de acuerdo a los métodos aprobados por la ASTM (Sociedades Americana para Pruebas y Materiales).

##### 4.4.1. Examen visual

Las muestras de aceite dieléctrico regenerado deben ser revisadas visualmente lo que permite verificar turbidez, partículas en suspensión, lodos y agua libre en el aceite. La norma (ASTM D1524, 2012) indica que un aceite aceptable debe ser claro, brillante y libre de cualquier tipo de contaminante, de no ser así se debe investigar su causa.

##### 4.4.2. Color

Consiste en clasificar el color del aceite-muestra de acuerdo a unos estándares (ASTM D1500, 2011) mediante la comparación de colores del 0,5 al 8,0 (Figura 1), lo que permite verificar cambios relativos en el aceite debidos al deterioro o la contaminación.

Figura 1. Cromatografía del aceite dieléctrico según su contaminación.

Guia de Color para aceites en Transformadores	Valores de Prueba relacionado con el color	Efecto del aceite en el Transformador
<b>aceite nuevo</b> 0.0-0.5	Acid (Neut.) No. mg. KOH/g. 0.03 to 0.10	Interfacial Tension Dynes/CM 30-45
<b>buen estado</b> 0.5-1.0	0.05 to 0.10	27-29
<b>aceite usado</b> 1.0-2.5	0.11 to 0.15	24-27
<b>condición marginal</b> 2.5-4.0	0.16 to 0.40	18-24
<b>condición mala</b> 4.0-5.5	0.41 to 0.65	14-18
<b>condición severa</b> 5.5-7.0	0.66 to 1.50	9-14
<b>condición extrema</b> 7.0-8.5	1.50 and higher	6-9

Suministra:
1. Enfriamiento eficiente
2. Preserva el aislamiento

Compuestos polares (lodos) en solución, producto de la oxidación del aceite disminuyen la TIF.
Acidos grasos cubren las bobinas. Lodos en solución listos para depositar. Probable depósitos en huecos.
En casi el 100% de los trafos, se depositan lodos en nucleos bobinas y aletas en este rango de color.
Los lodos se oxidan y se endurecen. El papel empieza a encogerse. Posibilidad de falla.
Los lodos impiden la transferencia de calor debido a la obstrucción de aletas y orificios de flujo.
Vasta cantidad de lodos que requieren otros medios de remoción diferentes al purgado de los mismos.

Fuente: (Myers, Kelly, & Parrish, 2014)

En la tabla 3 se clasifica los resultados de la prueba de color donde se busca el valor mínimo de aceptación llevando a cabo la regeneración de aceite dieléctrico.

Tabla 3. Valor aceptable e inaceptable de color de aceite dieléctrico regenerado.

COLOR	
<b>Aceptable</b> $\leq 3.5$	<b>Inaceptable</b> $> 3.5$

Fuente:(Briones, 2005)

#### 4.4.3. Densidad

Es la razón entre la masa de un volumen dado de aceite y la masa de agua para ese mismo volumen (D1298, 2005). Para aceite dieléctrico naftenico tiene una densidad entre 0,84 y 0,91 sin embargo, la mayoría de los aceites se encuentran en un rango de 0,86 y 0,89, pero para el aceite dieléctrico regenerado se requiere una densidad mínima que cumpla el rango establecido. Valores menores a 0,84 indican que pueden ser de origen Parafinicos, pero para valores mayores a 0,91 indican una posible contaminación de PCB (Bifenilos Policlorados).

#### 4.4.4. Viscosidad

Es la resistencia que ofrece un líquido a fluir en condiciones específicas, influye directamente en el coeficiente de transferencia de calor, lo cual conduce a un incremento en la temperatura de operación en los dispositivos. Bajo la norma de (ASTMD1200, 2005), los valores en cSt a 40°C son de 161 para aceite dieléctrico regenerado (Twilight, 2020).

## 5. METODOLOGÍA

La metodología se constituyó de 2 etapas, las cuales se describen a continuación.

### 5.1. Etapa 1. Regeneración del aceite

Actividades

#### 5.1.1. Preparación de la muestra

El aceite dieléctrico residual utilizado en el presente proviene del mantenimiento de los transformadores de Norte de Santander y fue recolectado por la empresa Biolubricantes S.A.S ubicada en los Patios Zona Industrial Meyer Cúcuta, Norte de Santander. Al llegar a la empresa, el aceite fue filtrado y se calentado a 100 °C por 30 minutos en una bomba de vacío con niveles de vacío hasta -550 mbar relativo y de presión hasta 660 mbar relativo TW-1M marca Zeny y una estufa UN marca Memmert, con el fin de reducir el contenido de humedad.

#### 5.1.2. Determinación de las variables que influyen en la regeneración de aceite dieléctrico con tierras de blanqueo.

Para determinar los factores más significativos para la regeneración de aceite dieléctrico residual a partir de tierras de blanqueo se tuvo en cuenta la experiencia de la parte de producción de la empresa Biolubricantes S.A.S y lo obtenido por (Alonso, 2013), lo que determino la influencia de la relación tierras-aceite, temperatura de activación, agitación y tiempo de contacto. Por esta razón, es importante evaluar la influencia de estos grados en la regeneración de aceite utilizando el método de contacto (Briones, 2005).

Debido a que los rangos de estudio de estos factores son muy amplios y considerando la experiencia de la empresa y la literatura, se estableció una temperatura de activación para las tierras de blanqueo entre 50-90 °C (Pure-Flo, 2020), tiempo de contacto de 15min-3h (Lazara & Diana, 2017) y relación tierras-aceite 1mg-100mL m:v (Duran & Contreras, 2006). La agitación se mantiene constante a 60 rpm.

Por lo tanto, los factores seleccionados para el estudio fueron a) Tiempo de contacto, b) Temperatura de activación, c) Relación tierras-aceite porque son estos los que tienen mayor influencia en el proceso de regeneración de aceite dieléctrico residual (Betancourt, 2020). El tiempo de contacto y la temperatura de activación de la tierra de blanqueo son las que permiten llevar a cabo la remoción de contaminantes (Agudelo, 2012). Finalmente la relación tierras-aceite fue considerada porque modifica el color en el aceite regenerado (Carrera, 2015).

Para el diseño factorial de regeneración de aceite dieléctrico fueron estudiados los factores: *i*) Relación tierra-aceite (5-10 m:v), *ii*) Temperatura de activación (60-80 °C), *iii*) Tiempo de contacto (30-90 min).

#### 5.1.3. Evaluación de las condiciones más adecuadas de tierra de blanqueo para regenerar el aceite dieléctrico residual.

Para establecer las mejores condiciones que permitan la regeneración de aceite dieléctrico se realizó, por duplicado, un diseño factorial  $2^3$  compuesto rotatable + puntos centrales, empleando para su análisis la metodología de superficie de respuesta

Para el diseño factorial y el análisis estadístico fue utilizado el software **MINITAB** versión V18 2018 prueba para Windows.

En la tabla 4 se presenta las variables independientes y los niveles empleados.

Tabla 4. Factores y Niveles del diseño experimental regeneración de aceite.

Variables independientes	Niveles de los factores	
<b>Tiempo de contacto (min)</b>	30 (-1)	90 (+1)
<b>Temperatura de activación(°C)</b>	60 (-1)	80 (+1)
<b>Relación tierras-aceite (m:v)</b>	5 (-1)	10 (+1)

Fuentes: Autor

Siguiendo el método de contacto se utilizó la balanza analítica FGH-1200 marca Furi para pesar el aceite dieléctrico residual para cada uno de los ensayos en un vaso de precipitado, posteriormente se empleó la plancha de agitación y calentamiento MS7-H550 marca DLAB para elevar la temperatura seguido de la adición de las tierras de blanqueo durante un tiempo de contacto controlado. Finalmente se realiza una filtración utilizando bomba de vacío TW-1M marca Zeny permitiendo la separación de las tierras de blanqueo y el aceite dieléctrico regenerado el cual fue almacenado en viales hasta el análisis de color (Escala de color de ASTM D-1500) y densidad (Método de prueba estándar ASTM D1298).

## 5.2. Etapa 2. Adición del mejorador de la viscosidad

Actividades:

### 5.2.1. Determinación de las variables que influyen en el proceso de mejora de viscosidad del aceite dieléctrico regenerado.

Teniendo claro las condiciones adecuadas de regeneración de aceite dieléctrico aceptable por la empresa, se determinaron los factores para la mejora de la viscosidad del aceite dieléctrico regenerado considerando la experiencia de Biolubricantes S.A.S y lo determinado por Jiménez, (2014) mostro la influencia principal de la concentración de MIV, temperatura de homogenización y tiempo de homogenización.

Debido a que los rangos de estudio de estos factores son muy amplios, se planteó para la relación MIV:aceite 3-15 m:v como lo indica la empresa Biolubricantes S.A.S debido a su experiencia, temperatura de homogenización de 70-90°C y un tiempo de homogenización de 3-5 h (Nordel, 2020), manteniendo una agitación constante a 60 rpm.

Por lo cual , los factores estudiados fueron a) Concentración de MIV, b) Temperatura de homogenización, c) Tiempo de homogenización ya que son los que mayor influencia tienen en el proceso de mejorar el índice de viscosidad (Tormos & Miró, 2016).

La concentración de MIV permitirá el incremento de la viscosidad del aceite dieléctrico regenerado. Y la temperatura y tiempo permiten una mezcla homogénea de aceite dieléctrico regenerado a sus mejores condiciones y MIV.

Como variable de respuesta se midió el índice de viscosidad y fueron estudiados como factores: *i*) Relación MIV-aceite (3-6 m:v), *ii*) Temperatura de homogenización (80-90 °C), *iii*) Tiempo de homogenización (180-240 min) bajo la experiencia de la empresa Biolubricantes S.A.S.

### 5.2.2. Evaluación de las condiciones más adecuadas para mejorar la viscosidad del aceite dieléctrico regenerado.

Para evaluar las condiciones se realizó un diseño factorial  $2^3$  para mejorar el índice de viscosidad del aceite dieléctrico regenerado a sus mejores condiciones. Para el diseño factorial y el análisis estadístico fue utilizado el software **MINITAB** versión V18 2018 prueba para Windows.

En la tabla 5 se presenta las variables independientes y los niveles empleados para llevar a cabo el diseño factorial  $2^3$ .

Tabla 5. Factores y Niveles del diseño experimental Mejorador de Índice Viscosidad.

Variables independientes	Niveles de los factores	
<b>Mejorador-aceite (m:v)</b>	3 (-1)	6 (+1)
<b>Temperatura de homogenización (°C)</b>	80 (-1)	90 (+1)
<b>Tiempo de homogenización (min)</b>	180 (-1)	240 (+1)

Fuentes: Autor

Realizando adicciones de concentración de MIV al aceite dieléctrico regenerado obtenido a las mejores condiciones, siguiendo la metodología propuesta por el área de producción de la empresa Biolubricantes S.A.S teniendo en cuenta los grados SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices) la cual se encarga de definir el grado de viscosidad de la base lubricante y utilizando un Viscosímetro de copa Ford serie PCE-12.

## 6. ANALISIS Y RESULTADOS DEL PROYECTO

### 6.1. Etapa 1: Regeneración de aceite

#### 6.1.1. Evaluación de las condiciones de tierra de blanqueo para regenerar el aceite dieléctrico residual

Evaluando las condiciones definidas para la regeneración de aceite dieléctrico residual se realizó el análisis de densidad y color.

#### 6.1.2. Análisis de la densidad

A partir de los resultados de los 40 experimentos (ANEXO 1) se evaluó el efecto de las factores y su interacción, aplicando el análisis de varianza (ANOVA) para la densidad (Tabla 6) y de acuerdo con el valor ( $P < 0,05$ ) se infiere que todas los factores incidencia significativa sobre la variable respuesta (densidad) a un nivel de confianza del 95%.

La tabla 6 se muestra el ANOVA del Pareto ajustado (ANEXO 2) para la densidad el cual muestra los factores más significativos en la regeneración de aceite dieléctrico.

Tabla 6. Resultados de análisis estadístico para la densidad (ANOVA).

Factores	GL	SC	SMC	Valor F	Valor P
Temperatura	1	0,000001	0,000001	0,03	0,862
Tierra	1	0,000585	0,000585	24,93	0,000
Tiempo	1	0,000105	0,000105	4,46	0,043
Temperatura*Temperatura	1	0,000053	0,000053	2,26	0,143
Tierra*Tierra	1	0,000023	0,000023	0,97	0,333
Tiempo*Tiempo	1	0,000224	0,000224	9,55	0,004
Temperatura*Tierra	1	0,000009	0,000009	0,38	0,540
Temperatura*Tiempo	1	0,000001	0,000001	0,04	0,846
Tierra*Tiempo	1	0,000000	0,000000	0,00	0,984
Falta de ajuste	5	0,000202	0,000040	2,02	0,111
Error puro	25	0,000502	0,000020		
Total	39	0,001737			

Fuente: Autor

GL: grados de libertad; SC: suma de cuadrados; SMC: suma media de cuadrados; F y P: Coeficientes de Fisher.

Una vez identificados los factores e interacciones relevantes se procedió a realizar el ajuste de los resultados experimentales (**Minitab**, versión prueba de Windows) obteniéndose (Ecuación 1) con un  $R^2$  de 0,994 lo que confirma la relación con los factores para la densidad y un mejor ajuste del modelo a sus datos.

Ecuación 1: Función objetivo empleada para la densidad del aceite dieléctrico regenerado.

$$Densidad = 0,89763 + 0,000016Temperatura - 0,001851Tierra + 0,000464Tiempo + 0,000003Tiempo * Tiempo$$

Empleando la ecuación 1 fue posible representar el comportamiento de la variable respuesta densidad a través de la respectiva superficie de contorno (Figura 2) donde se muestra el comportamiento de la tierra:aceite vs el tiempo de contacto con un valor fijo de temperatura de activación permitiendo mostrar el comportamiento de la densidad.

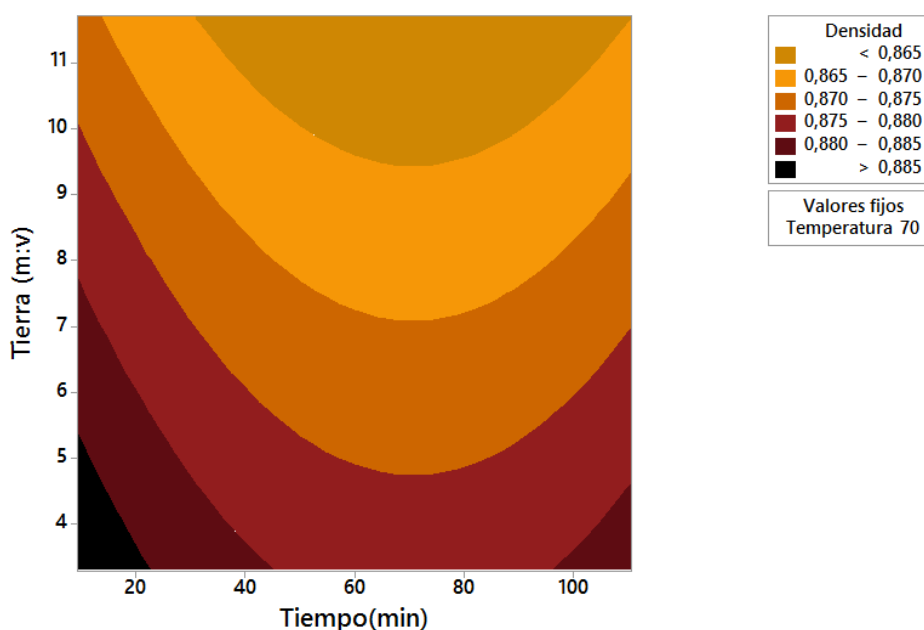
### 6.1.2.1. Efecto de la temperatura en la densidad

Realizando el análisis de la influencia de la temperatura en la densidad final del aceite dieléctrico residual (0,8621 g/mL), se pudo deducir que presenta un comportamiento de activación de las propiedades adsorbentes de las tierras de blanqueo (Figura 2). Además, el calentamiento controlado permite que el contacto entre el aceite dieléctrico y las tierras de blanqueo acelere la remoción de contaminantes presentes en el aceite de 0,89 a 0,821 g/mL (Valle & Miguez, 2015).

### 6.1.2.2. Efecto de la relación tierra-aceite en la densidad

El impacto de la relación tierra:aceite a diferentes concentraciones (5:100, 7:100, 10:100 m:v) presenta el efecto individual más significativo a la cual la densidad del aceite dieléctrico regenerado es afectada por la remoción de contaminantes debido a la adsorción de la tierra de blanqueo. En la Figura 2 la densidad del aceite dieléctrico regenerado se ve directamente afectada por la proporción de tierras presentes en el aceite. Este comportamiento también fue reportado por Avilés, (2011), quien encontró que la densidad disminuye a las grandes cantidades de tierra en contacto con aceite dieléctrico y una temperatura constante de activación. Además, la figura 2 muestra el comportamiento decreciente de la densidad a grandes adiciones de tierra en el aceite dieléctrico que se regenera debido a la remoción de contaminantes presentes en este.

Figura 2: Superficie contorno de respuesta Tiempo vs Tierra a Temperatura=70 °C



Fuente: Autor



### 6.1.2.3. Efecto del tiempo de contacto en la densidad

En la figura 2 se evidencia la disminución de la densidad a medida que transcurre el tiempo de contacto de las tierras en proporciones altas con el aceite dieléctrico, debido a que la remoción de contaminantes por parte de la tierra se ve influenciado por el tiempo de contacto.

Estos resultados son consistentes con Óscar Beltrán, (2014) y son conscientes que el tiempo de contacto con mejor remoción de contaminantes y por ende mejor densidad es de 60 a 90 min.

### 6.1.3. Análisis de color

Una vez realizados los 40 experimentos (ANEXO 1) se evaluó el efecto de los factores y su interacción, aplicando el análisis de varianza (ANOVA) para el color (Tabla 7) y de acuerdo con el valor ( $P < 0,05$ ) se infiere que todas los factores incidencia significativa sobre la variable respuesta (densidad) a un nivel de confianza del 95%.

En la tabla 7 se muestra la ANOVA del Pareto ajustado (ANEXO 3) para el color el cual muestra los factores más significativos en la regeneración de aceite dieléctrico.

Tabla 7. Resultados de análisis estadístico del color (ANOVA).

Factores	GL	SC.	MC	Valor F	Valor P
Temperatura	1	6,9222	6,9222	17,65	0,000
Tierra	1	22,4264	22,4264	57,18	0,000
Tiempo	1	8,8998	8,8998	22,69	0,000
Temperatura*Temperatura	1	0,4340	0,4340	1,11	0,301
Tierra*Tierra	1	0,0340	0,0340	0,09	0,771
Tiempo*Tiempo	1	3,8062	3,8062	9,71	0,004
Temperatura*Tierra	1	0,1406	0,1406	0,36	0,554
Temperatura*Tiempo	1	0,0156	0,0156	0,04	0,843
Tierra*Tiempo	1	0,3906	0,3906	1,00	0,326
Falta de ajuste	5	9,9738	1,9948	27,83	0,000
Error puro	25	1,7917	0,0717		
Total	39	55,1937			

Fuente: Autor

Una vez identificados los factores e interacciones relevantes se procedió a realizar el ajuste de los resultados experimentales (**Minitab**, versión prueba de Windows) obteniéndose (Ecuación 2) con un  $R^2$  de 0,996 lo que confirma la relación con los factores para el color y un mejor ajuste del modelo a sus datos.

Ecuación 2: Función objetivo empleada para el color del aceite dieléctrico regenerado.

$$\text{Color} = 12,973 - 0,0503 \text{ Temperatura} - 0,3624 \text{ Tierra} - 0,0694 \text{ Tiempo} + 0,000419 \text{ Tiempo} * \text{Tiempo}$$

Empleando la ecuación 2 fue posible representar el comportamiento de la variable respuesta color a través de la respectiva superficie de contorno (Figura 3-5) donde se muestra el comportamiento de los factores tierra:aceite, el tiempo de contacto y temperatura de activación permitiendo mostrar el comportamiento del color.

#### **6.1.3.1. Efecto de la temperatura en el color**

En las (Figuras 3 y 5) se muestra la influencia de la temperatura sobre el color del aceite dieléctrico regenerado la cual permite la activación de la tierra para la remoción y es importante para que la regeneración y adsorción de contaminantes por parte de la tierra de blanqueo se lleve a cabo, esto lleva a que el color se encuentre en el rango aceptable para aceites dieléctricos regenerados y la empresa Biolubricantes S.A.S. Este comportamiento ha sido observado por Zhao, *et al.*, (2004) quienes detectaron temperaturas en los rangos de 80-90°C en los que el color se encuentran en rangos aceptables según la norma ASTM D-1500, siendo similares a las temperaturas obtenidas en las figuras 3 y 5, las cuales muestran el mínimo valor de color en este rango de temperatura.

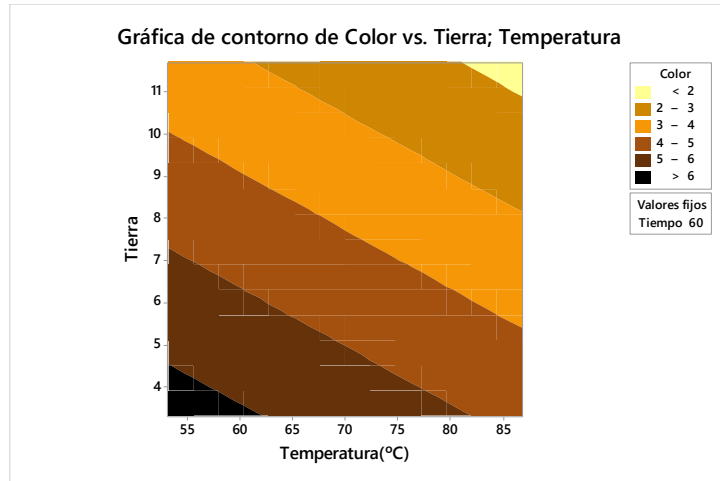
#### **6.1.3.2. Efecto de la relación tierra-aceite el color**

En la relación tierra-aceite a diferentes concentraciones (Figura 3 y 4) presenta en la proporción de mayor adición de tierras un color aceptable para la empresa Biolubricantes S.A.S en lo económico y siguiendo la norma ASTM D-1500. Además de ser el efecto más significativo debido a la remoción de contaminantes por parte de la adsorción de la tierra de blanqueo. Este comportamiento también fue reportado por Murillo,*et al.*, (2006) quienes encontraron que a mayor adición de tierras al aceite crudo de palma mejor color aceptable se obtendría. Sin embargo, Myers, *et al.*, (2014) determinaron que la proporción de tierras no debe ser muy mayor debido a que el contacto tierra:aceite debe ser totalmente homogéneo. Además, en las figuras 3 y 4 se observa que las proporciones definidas de tierra permiten llevar a cabo una remoción de contaminantes, lo que permite determinar un color aceptable para la regeneración del aceite dieléctrico.

#### **6.1.3.3. Efecto del tiempo de contacto en el color**

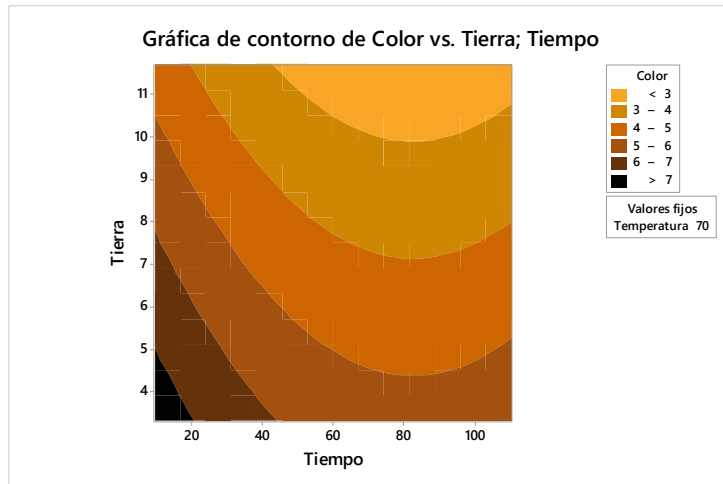
En la (Figura 4 y 5) se evidencia un compartió favorable del color con la prolongación del contacto de tierras-aceite durante tiempos determinados y observándose rangos en los cuales la remoción de contaminante fue favorable. Estos resultados también fueron encontrados por (Tapias, 2014) y además de determinar que a tiempos de contacto muy superiores la tierra de blanqueo pierde sus propiedades de adsorción. Esto fue semejante a lo encontrado en este trabajo, debido a que a tiempos excesivos de contacto entre las tierras y el aceite, se presenta un deterioro en el color como lo presentan las figuras 4 y 5.

Figura 3: Superficie de contorno de respuesta Temperatura vs Tierra a Tiempo=60 min



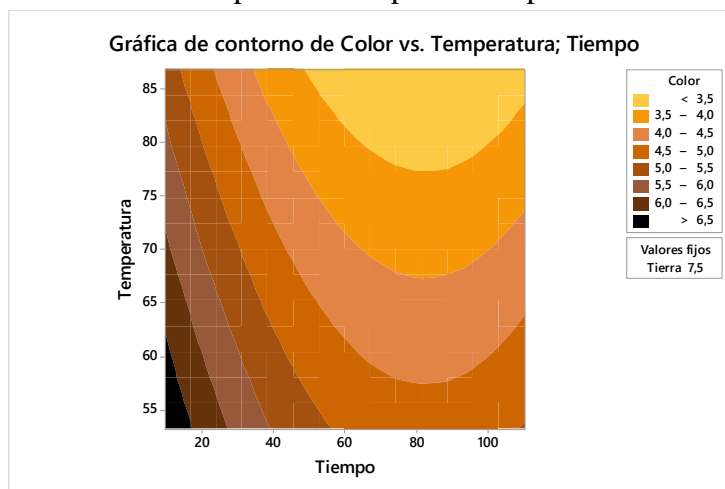
Fuente: Autor

Figura 4: Superficie de contorno de respuesta Tiempo vs Tierra a Temperatura=70 °C



Fuente: Autor

Figura 5: Superficie contorno de respuesta Tiempo vs Temperatura a Tierra =7,5 m:v

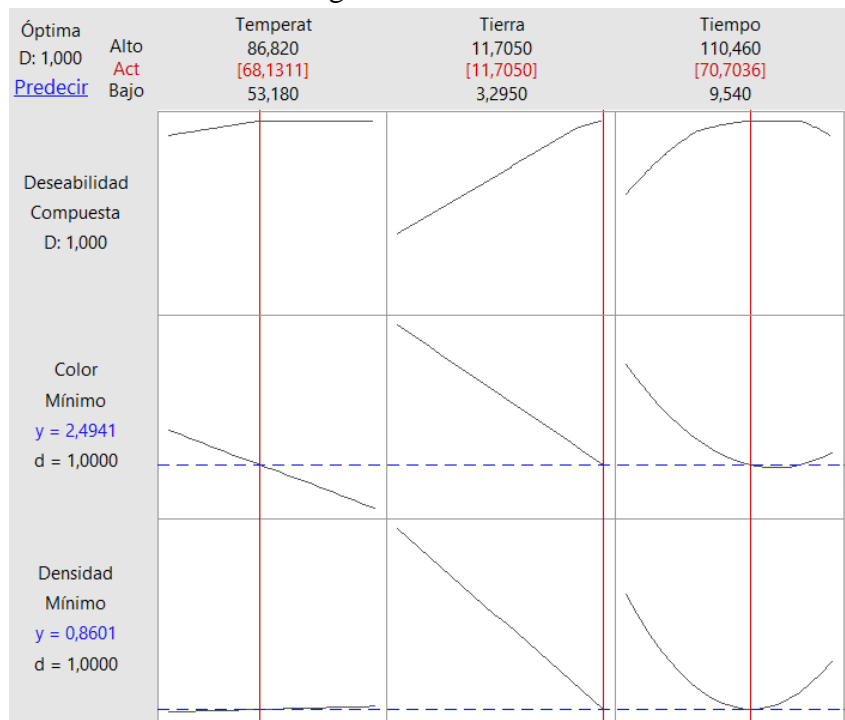


Fuente: Autor

## 6.2.CONDICIONES DE COLOR Y DENSIDAD DE ACEITE DIELECTRICO REGENERADO

En la figura 6 se muestra que las condiciones más adecuadas para obtener el mínimo de densidad y color en el aceite dieléctrico determinado por el software estadístico **Minitab**, con los factores de temperatura de 68°C; relación tierra-aceite de 11,70 m:v y un tiempo de contacto de 70 min, siendo estos los parámetros recomendados por el modelo estadístico, obteniéndose un mínimo teórico de color de 2,5 y la disminución de densidad a 0,8676 g/mL (Delgado & Fygueroa, 2016). Al comparar los resultados con las normas ASTM para la regeneración de aceite dieléctrico, se confirma la viabilidad de las condiciones establecidas por la predicción del software y lo obtenido en el laboratorio que lo confirmo, esto permite llevar a cabo la segunda etapa de adicción de mejorador de índice de viscosidad, partiendo de un aceite dieléctrico regenerado en las condiciones mencionadas anteriormente.

Figura 6: Condiciones favorables de regeneración de aceite dieléctrico.



Fuente: Autor

## 6.3. Etapa 2: Mejorador de índice de viscosidad del aceite dieléctrico

### 6.3.1. Evaluación de las condiciones para mejorar la viscosidad del aceite dieléctrico regenerado.

Se realizó un diseño experimental, cuyos 8 valores determinados por los ensayos se muestran (ANEXO 4), donde se evaluó el efecto de los factores y su interacción con la viscosidad, aplicando el ANOVA para la viscosidad (Tabla 8), y de acuerdo con el valor P se infiere que todas las variables incidencia significativa sobre la variable respuesta a un nivel de confianza del 95%.

En el (ANEXO 5) se puede apreciar los diagramas de Pareto sin ajustar y ajustado, los cuales muestran un orden de prioridad de los factores utilizados en el desarrollo del diseño de experimentos que confirma lo obtenido por la ANOVA del Pareto ajustado teniendo en cuenta los factores más importantes durante la adición de mejorador para el caso de la viscosidad en el aceite dieléctrico regenerado.

Tabla 8. Resultados de análisis estadístico de la viscosidad (ANOVA).

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	3	11781.0	3927.0	2416.62	0.000
<b>Lineal</b>	3	11781.0	3927.0	2416.62	0.000
<b>MIV-aceite (m:v)</b>	1	11552.0	11552.0	7108.92	0.000
<b>Temperatura (°C)</b>	1	84.5	84.5	52.00	0.002
<b>Tiempo (min)</b>	1	144.5	144.5	88.92	0.001
<b>Error</b>	4	6.5	1.6		
<b>Total</b>	7	11787.5			

Fuente autor

GL: grados de libertad; SC: suma de cuadrados; SC: suma media de cuadrados; F y P: Coeficientes de Fisher.

Una vez identificados los factores e interacciones relevantes se procedió a realizar el ajuste de los resultados experimentales (**Minitab**, versión prueba de Windows) obteniéndose (Ecuación 3) con un  $R^2$  de 0,993 lo que confirma la relación con los factores para la viscosidad y un mejor ajuste del modelo a sus datos.

Ecuación 3: Función objetivo empleada para la viscosidad del aceite dieléctrico regenerado.

$$Viscosidad(cSt) = -11.75 + 25.333 MIV - aceite(m:v) + 0.6500 Temperatura(^{\circ}C)0.1417 Tiempo(min)$$

Empleando la ecuación 3 fue posible representar el comportamiento de la variable respuesta viscosidad a través de la respectiva superficie de contorno (Figura 7-8) donde se muestra el comportamiento de los factores MIV:aceite, el tiempo de homogenización y temperatura de homogenización permitiendo mostrar el comportamiento de la viscosidad.

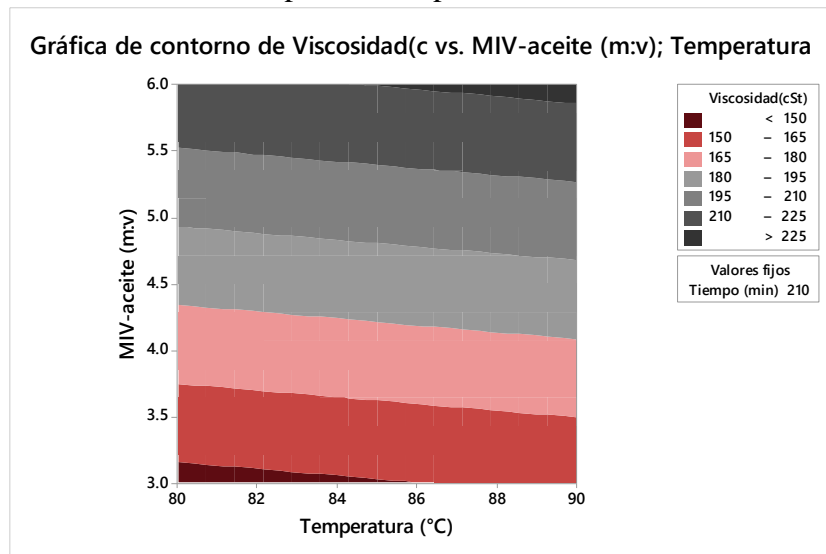
### 6.3.1.1.Efecto de la relación Mejorador de Índice de Viscosidad-aceite en la viscosidad

En la relación MIV-aceite a diferentes concentraciones (Figura 7 y 8) presenta en la proporción de menor adición de MIV una viscosidad aceptable de 161 cSt para la empresa Biolubricantes S.A.S en lo económico y siguiendo la norma ASTM D-1200. Siendo el efecto más significativo debido al aumento de la viscosidad del aceite dieléctrico regenerado. Siguiendo los parámetros definidos por las normas, (A.S.A, 2015) composiciones favorables para una base lubricante de aceite regenerado con un índice de viscosidad mayor.

### 6.3.1.2. Efecto de la temperatura y el tiempo de contacto en la viscosidad

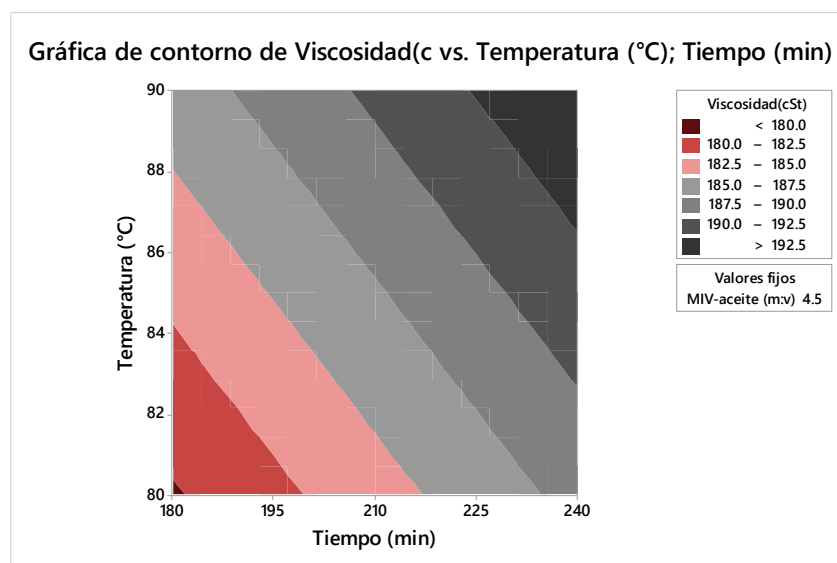
En la figura 8 se evidencia el comportamiento de la viscosidad a un tiempo y temperatura, para la homogenización de MIV, donde refleja que la temperatura y el tiempo son inversamente proporcionales a la variación de viscosidad debido a la homogenización. Nordel, (2020) recomienda condiciones de operación para llevar a cabo una mejor homogenización de MIV a temperatura (75-80 °C) y tiempo (180-190 min), similares a los reportados por (Tormos & Miró, 2016) quienes además recomiendan mantener constante los factores con el fin de evitar pérdidas y tener una mejor homogenización de MIV.

Figura 7: Superficie contorno de respuesta Temperatura vs Tierra-Aceite a Tiempo=210 min



Fuente: Autor.

Figura 8: Superficie contorno de respuesta Temperatura vs Tiempo a Tierra-Aceite =4,5 (m:v)

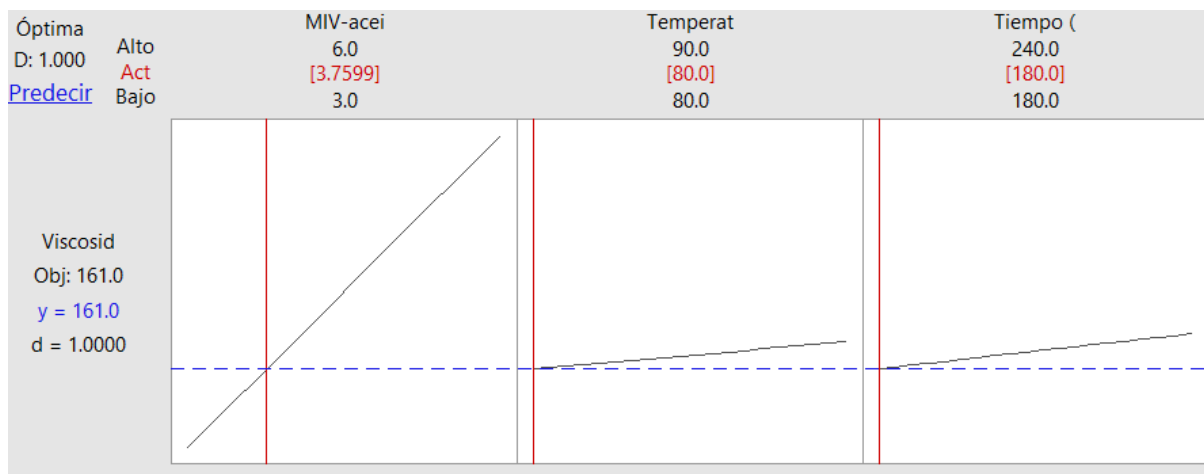


Fuente: Autor.

## 6.4. CONDICIONES DE LA VISCOSIDAD EN EL ACEITE DIELECTRICO REGENERADO

La figura 9 muestra las condiciones más adecuadas para mejorar el índice de viscosidad (MIV) del aceite dieléctrico regenerado (Temperatura: 80°C; MIV-Aceite:3,75 m:v y tiempo de 180 min) que corresponden a un mínimo teórico de viscosidad 161 cSt (Terpel, 2018) (Mobil, 2019) valor deseado por la empresa Biolubricantes S.A.S. Teniendo claro que un aceite o base lubricante no debe ser muy viscoso a bajas temperaturas para permitir un arranque fácil, pero tampoco debe ser muy poco viscoso a elevadas temperaturas para prevenir demasiada fricción y demasiado consumo de aceite (Texaco, 2016). Estos resultados confirman la importancia de MIV para mejorar la viscosidad del aceite dieléctrico regenerado.

Figura 9: Condiciones favorables de regeneración de aceite dieléctrico.



Fuente: Autor

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se logró mejorar las propiedades fisicoquímicas (color, viscosidad, densidad) del aceite dieléctrico residual en la empresa Biolubricantes S.A.S, empleando tierras de blanqueo y un mejorador de índice de viscosidad (MIV), para su aplicación como base lubricante en motores de bajo rendimiento, determinando y evaluando los factores que influyen a condiciones adecuadas en la regeneración de aceite y la mejora del índice de viscosidad.

El análisis estadístico confirma que todos los factores (temperatura de contacto, relación tierra:aceite, tiempo de contacto, temperatura de homogenización, relación MIV:aceite, tiempo de homogenización) considerados tienen una influencia significativa ( $P < 0.05$ ) sobre la densidad, color y viscosidad.

A partir de este análisis fue posible determinar y evaluar las condiciones de regeneración y mejorador de índice de viscosidad. Es importante subrayar la consideración en la etapa 1 de la relación Tierra: Aceite, por lo que se consideró como un factor dentro del primer diseño experimental. Asimismo, se evidenció que para mejorar simultáneamente el color y la viscosidad el valor favorable de dicha relación fue 11,70 m:v. Para el segundo diseño experimental, en la etapa 2 la relación MIV:aceite evaluó el valor (3,75 m:v), siendo muy aceptado por la empresa Biolubricantes S.A.S.

Para las dos etapas es importante considerar, mantener un control de la temperatura y el tiempo, ya que para la primera etapa se dieron condiciones adecuadas de operación a 68,13°C y 70 min; y que al pasar los 90°C de temperatura los aceites empiezan a deteriorarse nuevamente.

Respecto a la segunda etapa (mejorador de índice de viscosidad), se dieron condiciones de temperatura 80°C y un tiempo 180 min adecuadas de operación que permiten una homogenización completa del MIV.

Finalmente se obtuvo una base lubricante de aceite dieléctrico regenerado con mejorador de índice de viscosidad (MIV) cumpliendo con los valores aceptables por las normas (ASTM) de densidad (0,86 g/mL), color (2,5) y viscosidad (161 cSt SAE), además cumpliendo con las necesidades de la empresa Biolubricantes S.A.S.



## **8. RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar una inspección visual al aceite dieléctrico residual que es recolectado por la empresa Biolubricantes S.A.S, de acuerdo con su escala de color dispuesto por la norma ASTM D1500 y a su vez realizar a escala laboratorio la etapa de regeneración a sus condiciones óptimas, para confirmar el deterioro con el que será ingresado a proceso.

Para garantizar un proceso a escala industrial se recomienda que los equipos estén destinados únicamente para aceite dieléctrico residual, evitando contaminaciones durante el proceso especialmente en la etapa de filtración de aceite regenerado y tierras de blanqueo.

En la etapa 2 (mejorador de índice de viscosidad), adición de mejorador de índice de viscosidad (MIV), el uso adecuado del viscosímetro de copa Ford, es fundamental para tener el control de la homogenización del MIV en el aceite dieléctrico regenerado, debido a que es un equipo muy rudimentario, por ello la importancia de adquirir un viscosímetro electrónico que agilice y precise los resultados de forma más práctica, garantizando la calidad de la base lubricante por parte de la empresa Biolubricantes S.A.S.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- A.S.A. (2015). Lubricantes: Especificaciones Y Normativa.Mantenimiento de vehiculos,
- Agudelo, E. (2012). Un método de gestión ambiental para el tratamiento y la disposición final adecuada de un residuo peligroso. *Gestión y Ambiente*, 15(2), 101-115. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169424095008>
- Alexandra, R., & Acosta, D. (2014). *Manual para el manejo integral de aceites dieléctricos vegetales utilizados en los transformadores de distribución de energía eléctrica de la costa atlántica. Applied Microbiology and Biotechnology*. UNIVERSIDAD DE LA COSTA. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2013.06.007>
- Alonso, I. (2013). Aceites Para Transformadores, Modulo 8.
- ASTM D1500, I. U. S. (2011). Standard Test Method for ASTM Color of Petroleum Products ( ASTM Color Scale ). *Annual Book of ASTM Standards*, 05(October), 1-5. <https://doi.org/10.1520/D1500-12R17>.This
- ASTM D1524. (2012). Standard Test Method for Visual Examination of Used Electrical Insulating Oils of Petroleum Origin in the Field 1. *Annual Book of ASTM Standards*, i(Reapproved 2010), 1-2. <https://doi.org/10.1520/D1524-15.2>
- ASTMD1200. (2005). Standard Test Method for Viscosity by Ford Viscosity Cup, 94(Reapproved), 2-5.
- Avilés, J. P. (2011). Diseño y construcción de un sistema de control automático para optimizar el uso de una máquina tipo Brizio Basi Dov 4000, para tratamiento de aceite dieléctrico de transformador, para la Empresa TECNIESAT, 172.
- Betancourt, A. (2020). *Evaluación de la reactivación de tierras de blanqueo como mejora en el proceso de blanqueo de aceite crudo de palma (acp) en la compañía c.i. sigra s.a.* UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO.
- Biolubricantes s.a.s. (2020). Biolub s.a.s. Recuperado 16 de septiembre de 2020, de <https://www.biolub.com.co/>
- Briones, G. (2005). *Análisis técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos con tierra fuller y deslodificación de bobinados en transformadores*. escuela superior politecnica del litoral.
- Camargo, C. (2016). *Biotratamiento de aceites dieléctricos usados*. Universidad Nacional de Colombia Facultad.
- Carrera, J. (2015). *Sistema de pronóstico para la regeneración de aceites para transformadores basados en algoritmos filtro de partículas*.
- Cengel, Y. a., & Boles, M. E. (2011). *Termodinamica - Cengel 7th. Termodinamica*. McGRAW-HILL/Interamericana editores, S.A. DE C.V.
- Correa, I., & Serna, M. (2017). Aceites lubricantes para vehículos y uso industrial-Global Oil.
- D1298, A. (2005). ASTM D 1298 – 99, Método de Prueba Estándar para Densidad , Densidad Relativa ( Gravedad Específica ), o Gravedad API del Petróleo y Productos de Petróleo Líquido por el Método del Hidrómetro. *ASTM International, Manual de Normas de Medición de Petróleos (MPMS)*, 9(Reaprobada), 1-7.
- Dane. (2019). Encuesta (EMCM). Recuperado 18 de septiembre de 2020, de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-interno/encuesta-emcm>
- Delgado, J., & Fygueroa, S. (2016). Diseño de un equipo de pruebas rápidas para aceites usados. *Inge Cuc*, 12(1), 80-85. Recuperado de <https://doi.org/10.17981/ingecuc.12.1.2016.08>
- Delinchant, B., Mandil, G., & Wurtz, F. (2020). LIFE CYCLE COST AND ENVIRONMENTAL IMPACT OPTIMIZATIONS OF A LOW VOLTAGE DRY TYPE DISTRIBUTION TRANSFORMER.

- Duran, M., & Contreras, N. (2006). Alternativa de tratamiento para tierras fuller contaminadas con aceite dielectrico. *Alternativa de tratamiento para tierras fuller contaminadas con aceite dielectrico.*, 3(32), 419-424. <https://doi.org/10.22517/23447214.6329>
- EPA. (2019). Leyes y Normas – Reglamentos ambientales | EPA en español | US EPA. Recuperado 15 de septiembre de 2020, de <https://espanol.epa.gov/espanol/leyes-y-normas-reglamentos-ambientales>
- Garcia, S. I. (2012). La contaminación ambiental con Bifenilos Policlorados y su impacto en salud pública, 1-6.
- Jiménez, D. (2014). *Estudio de la composición relativa entre un lubricante mineral con lubricantes orgánicos y su influencia en el comportamiento de la densidad y viscosidad a diferente temperatura*. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO.
- Lazara, S., & Diana, C. (2017). *Metodo para la regeneracion de aceites dielectricos con tierra fuller reutilizada*. universidad nacional del callao.
- Lubricantes Wander. (2012). *Aditivos para lubricantes*. <https://wander/>
- Marulanda, V. F., & Bolaños, G. A. (2011). Destrucción de aceites dieléctricos mediante oxidación en agua supercrítica: hacia una alternativa de proceso para tratamiento de bifenilos policlorados (PCBs). *Ingeniería Y Competitividad*, 11(2), 41-52. <https://doi.org/10.25100/iyc.v11i2.2460>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006). *Manual Técnico para el Manejo de Aceites Lubricantes Usados*. <https://doi.org/958-97878-8-6>
- Mobil. (2019). Propiedades y beneficios potenciales Aplicaciones Especificaciones y Aprobaciones, 1-3.
- Murillo, J., & Marchena, V. (2006). *ESTUDIO BÁSICO DE CONTAMINACIÓN EN ACEITES DIELECTRICOS MEDIANTE LÁSER*. Universidad de Costa Rica.
- Myers, S. D., Kelly, J. J., & Parrish, R. H. (2014). A Guide to Transformer Maintenance.
- Nordel, I. (2020). Nordel™ ip 3745p, (400), 2-3.
- Óscar Beltrán, S. A. (2014). Tecnologías de tratamiento para la tierra fuller contaminada con aceite dieléctrico, 33-48.
- Plutarco Edwin. (2009). *Plan de manejo para una disposición final segura del aceite dieléctrico generado por los transformadores de potencia y distribución de la empresa eléctrica ambato S.A. Atmospheric Chemistry and Physics*. Universidad Técnica de Ambato El. <https://doi.org/10.1029/2008GB003237>
- Pnuma. (2002). Transformadores y condensadores con PCB: desde la gestión hasta la reclasificación y eliminación. *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 1*.
- Pure-Flo. (2020). Perform 6000. Recuperado de <https://pureflo.com/Tierrasdeblanqueo>
- Rebolledo, G. (2014). Evaluación de la viabilidad técnica y económica de la utilización del aceite dieléctrico vegetal como sustituyente del aceite dieléctrico mineral en transformadores de distribución nuevos y usados en las empresas municipales de Cali guissela, 2014(June), 1-2.
- Rymel. (2015). Catalogo de transformadores.
- Tapias, C. (2014). *Re-potenciación y automatización de la purificadora de aceite dieléctrico marca KATO utilizada en la central termoeléctrica Guangopolo de la empresa Celec Ep Termopichincha*. Recuperado de <https://www.mendeley.com/viewer/?fileId=282e909a-f205-9c7f-2a8d-8eb4178ef2a0&documentId=e2fa4d59-1229-3430-a1f3-0438f4e6f8b8>
- Terpel. (2018). *Lubricantes Oiltec* (Vol. 66).
- Texaco, I. (2016). Operación de motores diesel de dos combustibles y de gas., 20-156.
- Tormos, B., & Miró, G. (2016). Aceites de motor de baja viscosidad: Ahorro de combustible y ensayos en condiciones reales. *Dyna (Spain)*, 91(6), 668-674.

<https://doi.org/10.6036/7974>

Twilight, S. A. (2020). Copa Ford • SI-FC4, (1205), 1-4. Recuperado de <https://twilight.com.mx>

Valle, D., & Miguez, I. (2015). *Diseño y automatización de una máquina de regeneración, filtración y desgasificación de aceite dieléctrico utilizado en transformadores mediante el método de percolación de tierra fuller y termovacío.*

Zhao, Q. (2004). Diffraction pattern and optical activity of complex fluids under external electric field. *Applied Physics Letters*, 84(11), 1985-1987. <https://doi.org/10.1063/1.1687461>

## 10. ANEXOS

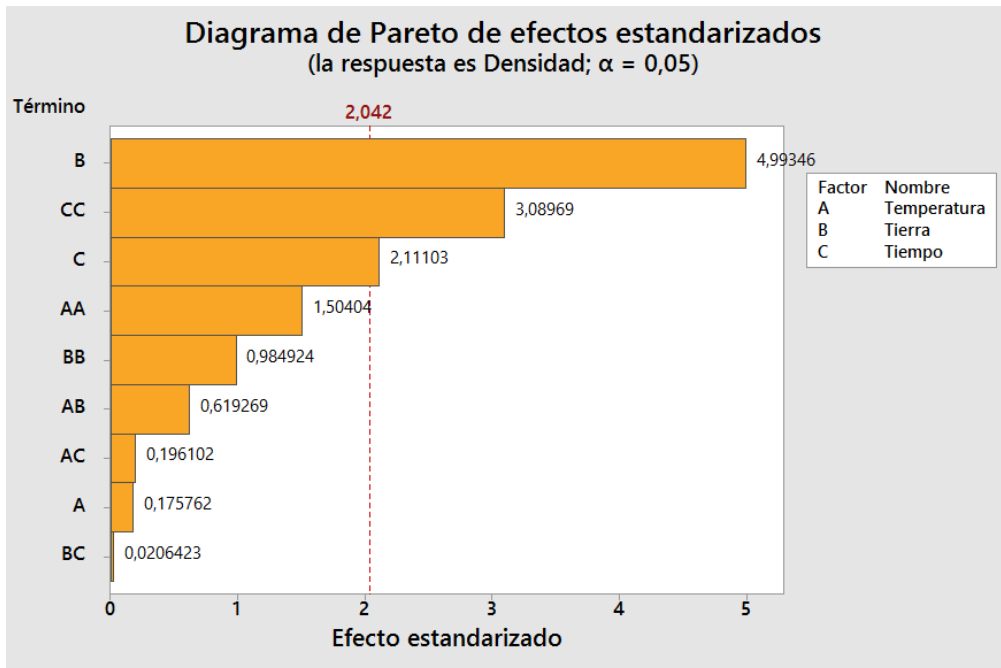
### ANEXO 1. RESULTADOS DEL DISEÑO FACTORIAL 2<sup>3</sup> COMPUESTO CENTRAL ROTABLE + PUNTOS CENTRALES PARA REGENERACIÓN DE ACEITE DIELECTRICO

	Temperatura (°C)	Tierra-Aceite (m:v)	Tiempo (min)	Color	Densidad (g/mL)
1	60	5	30	6	0,8721
2	80	5	30	5	0,8768
3	60	10	30	3	0,8654
4	80	10	30	3	0,8653
5	60	5	90	5	0,8676
6	80	5	90	4,5	0,8775
7	60	10	90	3,5	0,8655
8	80	10	90	2,5	0,8621
9	53,18	7,5	60	5,5	0,8683
10	86,82	7,5	60	3	0,8694
11	70	3,295	60	6	0,8854
12	70	11,705	60	3	0,8655
13	70	7,5	9,54	7	0,8863
14	70	7,5	110,46	4	0,8687
15	70	7,5	60	4	0,8676
16	70	7,5	60	4,5	0,8681
17	70	7,5	60	4	0,8668
18	70	7,5	60	4	0,8671
19	70	7,5	60	4,5	0,8683
20	70	7,5	60	4	0,8674
21	60	5	30	6	0,8803
22	80	5	30	5	0,8739
23	60	10	30	3,5	0,8639
24	80	10	30	3,5	0,8651
25	60	5	90	4,5	0,8765
26	80	5	90	4	0,8756
27	60	10	90	3	0,8645
28	80	10	90	2,5	0,8621
29	53,18	7,5	60	6	0,8693
30	86,82	7,5	60	3	0,8693
31	70	3,295	60	6	0,8786
32	70	11,705	60	3,5	0,8634
33	70	7,5	9,54	7,5	0,8878
34	70	7,5	110,46	4,5	0,8804
35	70	7,5	60	4	0,8757
36	70	7,5	60	4,5	0,8765
37	70	7,5	60	4	0,8723
38	70	7,5	60	4	0,8783
39	70	7,5	60	4,5	0,8698
40	70	7,5	60	4	0,8687

Fuente: Autor

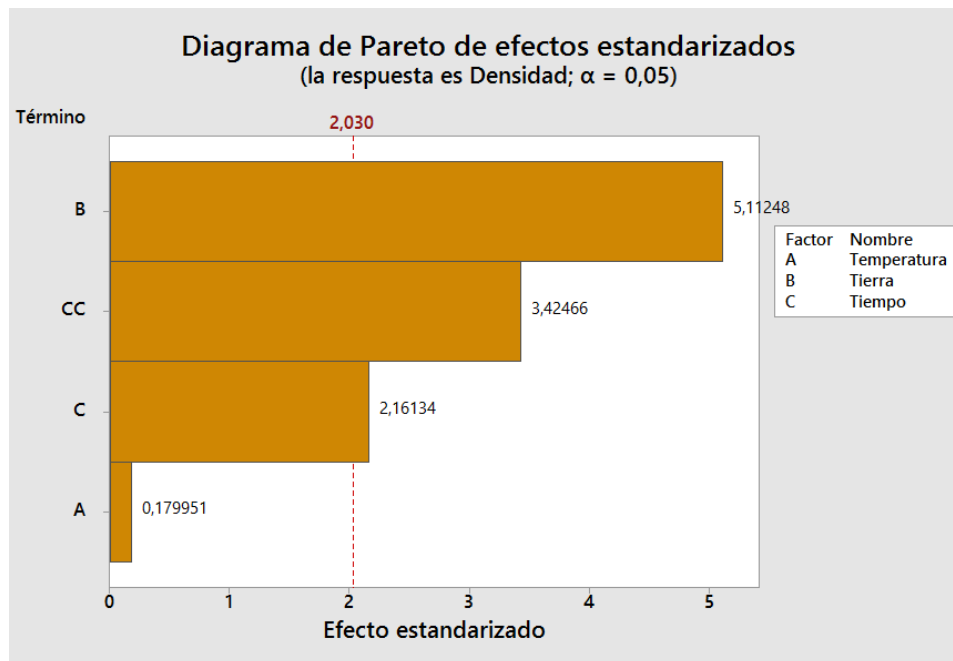
## ANEXO 2. DIAGRAMA DE PARETO DE LA DENSIDAD PARA EFECTOS ESTANDARIZADOS

SIN AJUSTAR



Fuente: Autor

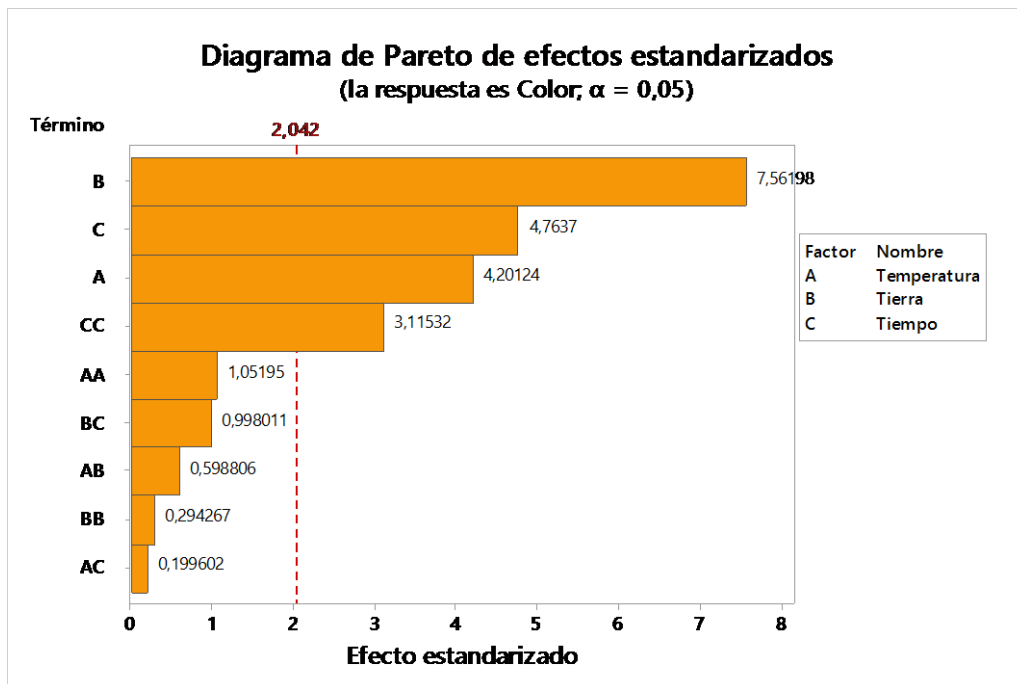
AJUSTADO



Fuente: Autor

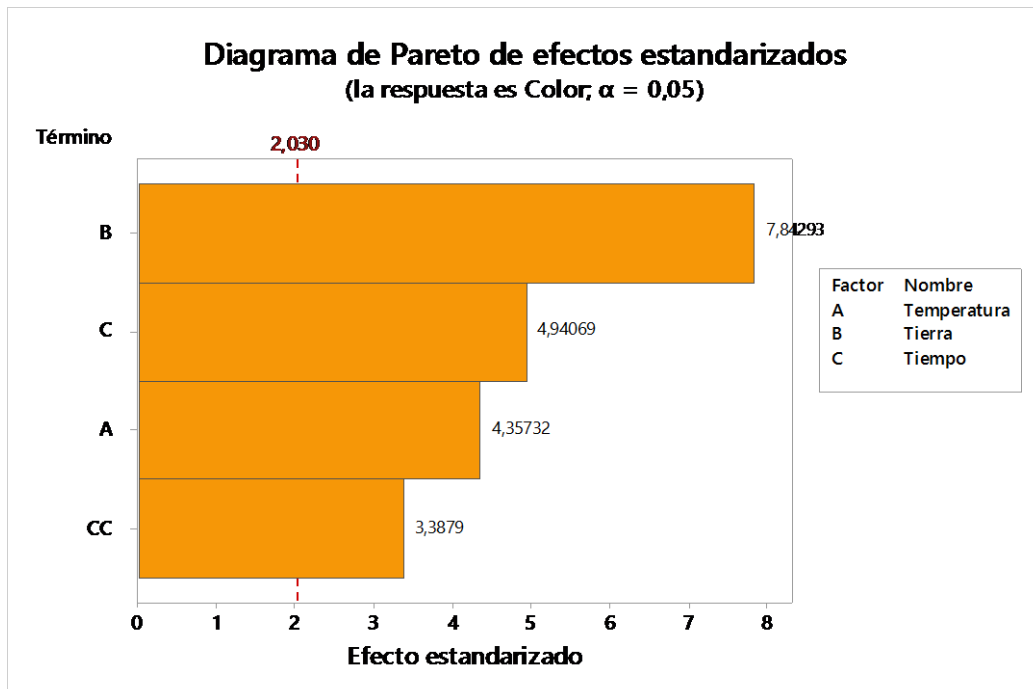
### ANEXO 3. DIAGRAMA DE PARETO DE COLOR PARA EFECTOS ESTANDARIZADOS

Sin ajustar



Fuente: Autor

Ajustada



Fuente: Autor

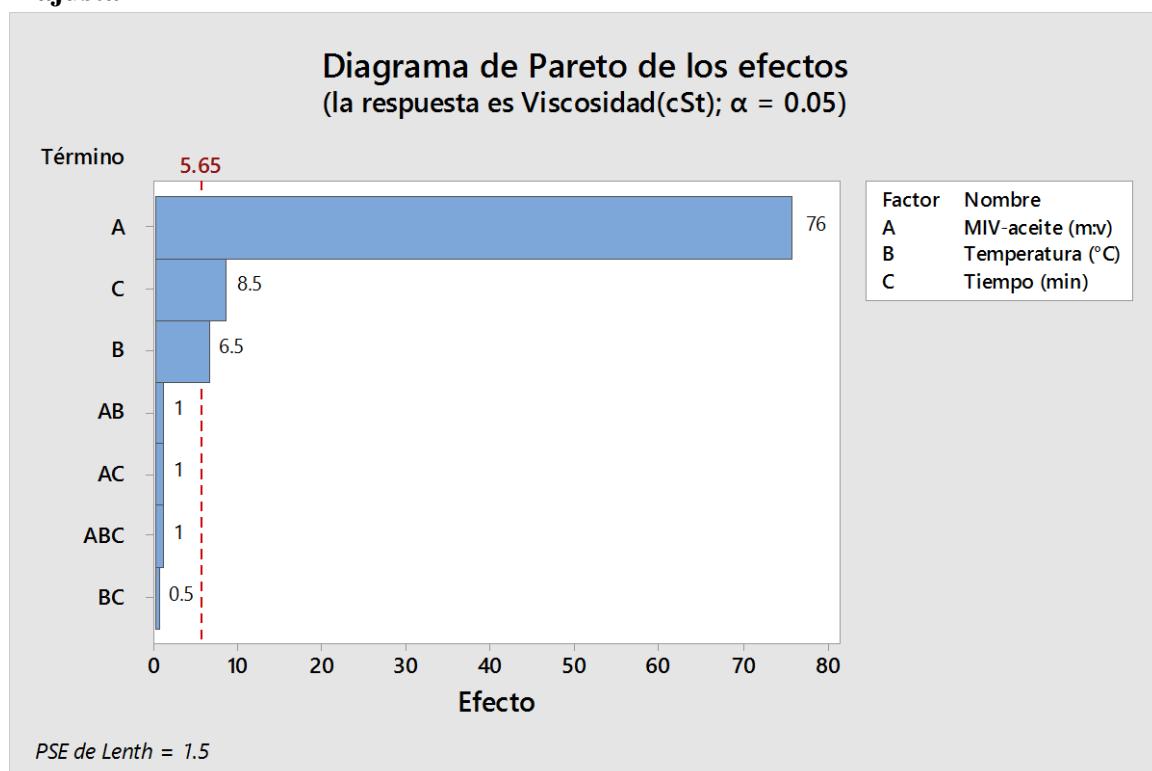
#### ANEXO 4. RESULTADOS DEL DISEÑO FACTORIAL 2<sup>3</sup> DE MEJORADOR DE ÍNDICE DE VISCOSIDAD

	Mejorador-aceite (m:v)	Temperatura de homogenización (°C)	Tiempo de homogenización (min)	Viscosidad (cSt)
1	3	90	240	156
2	3	80	240	152
3	6	80	180	218
4	6	80	240	225
5	3	90	180	148
6	3	80	180	141
7	6	90	240	233
8	6	90	180	225

Fuente: Autor

#### ANEXO 5. DIAGRAMA DE PARETO DE LA VISCOSIDAD PARA EFECTOS ESTANDARIZADOS

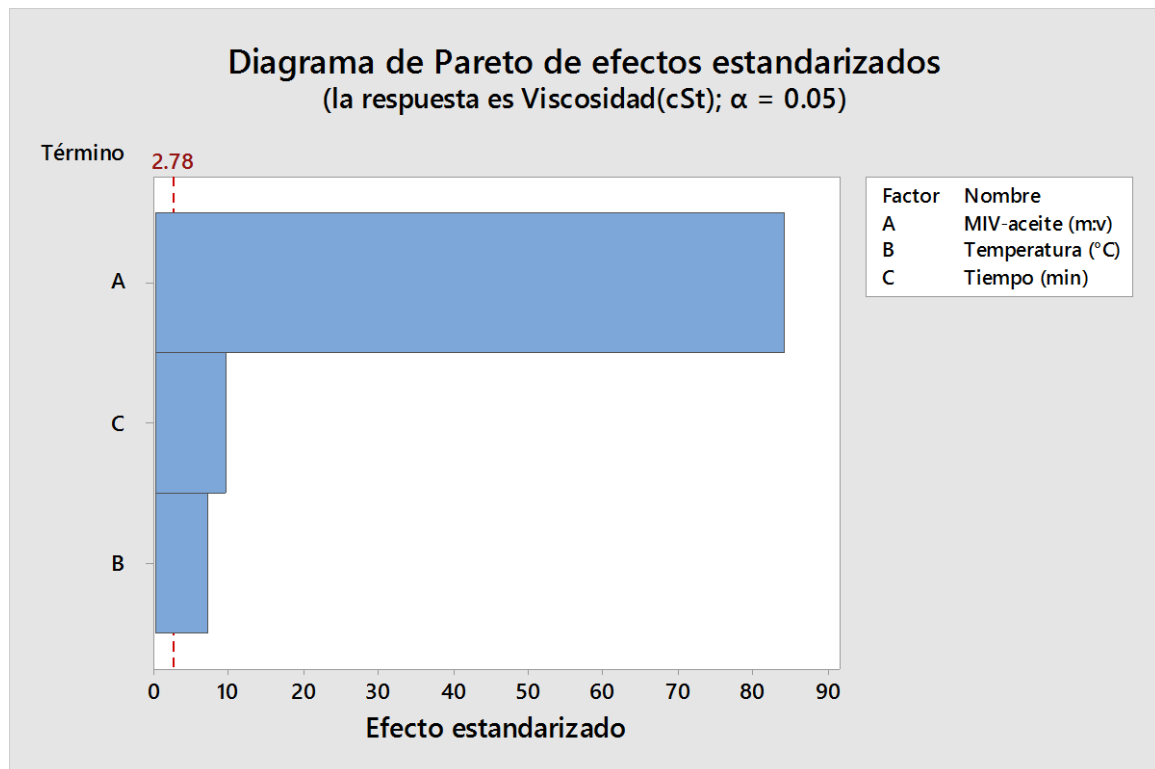
Sin ajustar



Fuente: Autor



## Ajustados



Fuente: Autor