

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“MÉTODO PARA LA REGENERACIÓN DE  
ACEITES DIELECTRICOS CON TIERRA  
FULLER REUTILIZADA”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
QUÍMICO**

**SICCHA LAZARO, CARMEN DIANA**

**Callao, Febrero, 2017  
PERÚ**



## **PRÓLOGO DEL JURADO**

La presente Tesis fue Expuesto por la Bachiller **SICCHA LÁZARO CARMEN DIANA**, ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

ING° SANEZ FALCON LIDA CARMEN            PRESIDENTE

ING° TOLEDO PALOMINO MARÍA ESTELA    SECRETARIO

ING° CHAMPA HENRIQUEZ OSCAR MANUEL VOCAL

ING° RANGEL MORALES FABIO MANUEL    ASESOR

Tal como está asentado en el Libro N° 1 Folio N° 5 y Acta N° 004 de Sustentación por la Modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis, de fecha **27 DE FEBRERO 2017**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis, de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado por Resolución N° 082-2011-CU de fecha 29 de abril de 2011 y Resolución N° 221-2012-CU de fecha 19 de setiembre de 2012.

## **DEDICATORIA**

A Dios, que ha sido durante todo  
este tiempo mi guía y fortaleza, y a las personas  
que día a día se esfuerzan para lograr su metas y objetivos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestra querida Universidad Nacional del Callao, por su infinita fuente de enseñanza académica, así como las valiosas lecciones de vida aprendidas a lo largo de nuestra estadía en esta maravillosa casa de estudios que nos enriquecieron como personas y como profesionales.

A todos aquellos docentes que durante nuestras vidas universitarias nos dieron sus enseñanzas, las que contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	2
ÍNDICE.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS .....	4
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	6
ÍNDICE DE TABLAS .....	7
RESUMEN .....	8
ABSTRAC.....	10
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.....</b>	<b>11</b>
1.1. Identificación de problema .....	11
1.2. Formulación del problema.....	12
1.2.1. Problema General.....	12
1.2.2. Problemas Específicos.....	12
1.3. Objetivos de la investigación .....	12
1.3.1. Objetivo general .....	12
1.3.2. Objetivos específicos .....	12
1.4. Justificación.....	13
1.4.1. Justificación tecnológica.....	13
1.4.2. Justificación económica .....	13
1.4.3. Justificación ambiental.....	14
1.5. Importancia.....	14
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
2.1. Antecedentes de estudio .....	16
2.2. Bases teóricas.....	22

2.2.1. Método de recuperación de Tierra Fuller .....	22
2.2.2. Proceso de regeneración de aceites dieléctricos .....	22
2.2.3. Principio de tierra fuller .....	25
2.3. Marco conceptual.....	28
2.3.1. Tierra fuller.....	28
2.3.2. Los aceites dieléctricos .....	33
2.3.3. Transformadores eléctricos en la industria.....	40
2.4. Definiciones de términos .....	43
<b>CAPÍTULO III: VARIABLES E HIPÓTESIS .....</b>	<b>45</b>
3.1. Variables de investigación .....	45
3.1.1. Variable dependiente.....	45
3.1.2. Variable independiente.....	45
3.2. Operacionalización de variables.....	45
3.3. Hipótesis .....	46
3.3.1. Hipótesis General.....	46
3.3.2. Hipótesis Específicas .....	46
<b>CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA .....</b>	<b>47</b>
4.1. Tipo de investigación .....	47
4.2. Diseño de investigación .....	47
4.3. Diseño experimental.....	50
4.3.1. Diseño de equipo .....	52
4.3.2. Equipos, materiales y reactivos .....	54
4.4. Desarrollo Experimental .....	55
4.4.1. Balance de materia .....	55
4.4.2. Tratamiento de materia prima .....	59
4.4.3. Proceso de Regeneración de aceite dieléctrico deteriorado .....	62
4.4.4. Obtención del producto final – aceite dieléctrico regenerado .....	63
4.4.5. Operación y control de pruebas .....	64
4.4.6. Procedimiento de pruebas de laboratorio .....	65
<b>CAPÍTULO V: RESULTADOS .....</b>	<b>70</b>
5.1. Resultados para las condiciones óptimas de operación .....	70

5.2. Resultados de los parámetros de aceites dieléctricos.....	78
5.3. Resultados del método para la regeneración de aceites dieléctricos .....	82
<b>CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>85</b>
6.1. Contraste de hipótesis con el resultado .....	85
6.2. Contrastación con otros estudios similares .....	88
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>90</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>91</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>98</b>
Anexo 1: Matriz de consistencia .....	98
Anexo 2: Pruebas según ASTM para aceites dieléctricos .....	99
Anexo 3: Protocolo de análisis físico químico de aceites dieléctricos .....	100
Anexo 4: Protocolo de análisis físico químico de aceites dieléctricos – después de regenerar con tierra fuller nueva.....	101
Anexo 5: Fotografía microscópica para la tierra fuller contaminada.....	102
Anexo 6: Espectograma para la tierra fuller contaminada.....	102
Anexo 7: Propiedades típicas de la tierra fuller utilizada en la regeneración del aceite dieléctrico .....	103



## ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Columna o Torre de Regeneración .....	23
2.2. Sistema de columnas acondicionadas para la Regeneración .....	25
2.3. Tierra Fuller como adsorbente .....	26
2.4. Tierra Fuller o tierra de batán .....	29
2.5. Especificaciones de Arcilla atapulguita – Ultra Clear .....	31
2.6. Estructura piramidal de los silicatos .....	32
2.7. Fórmula Química de algunos Hidrocarburos parafínicos .....	34
2.8. Fórmula Química de algunos Hidrocarburos nafténicos .....	35
2.9. Fórmula Química del Benceno .....	35
2.10. Comportamiento Típico de la viscosidad de un aceite dieléctrico con las variaciones de temperaturas .....	37
2.11. Aceite en función de su temperatura dentro de un transformador. .	41
2.12. Clasificación de aceites dieléctricos .....	42
2.13. Fotos microscópicas de aceite con distintos grados de acidez .....	43
4.1. Variables de Diseño en el proceso .....	50
4.2. Variables de Diseño y Operación .....	50
4.3. Equipo Regenerador .....	52
4.4. Diseño de Equipo Regenerador .....	53
4.5. Balance de materia de preparación de la muestra .....	56
4.6. Balance de materia de pesado de muestra .....	57
4.7. Balance de materia en proceso de Regeneración .....	58
4.8. Proceso de secado de tierra Fuller en horno .....	60

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

5.1. Tensión Interfacial versus Tiempo al 100% TLv .....	71
5.2. Tensión Interfacial versus Tiempo al 50% TLv .....	71
5.3. Acidez versus Tiempo al 100% TLv .....	72
5.4. Acidez versus Tiempo al 50% TLv .....	72
5.5. Tensión Interfacial versus Temperatura al 100% TLv .....	74
5.6. Tensión Interfacial versus Temperatura al 50% TLv .....	74
5.7. Acidez versus Temperatura al 100% TLv .....	75
5.8. Acidez versus Temperatura al 50% TLv .....	75

## ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Operacionalización de Variables.....	45
4.1. Diseño Experimental.....	51
4.2. Lista de Equipos y materiales.....	54
4.3. Lista de Reactivos e Insumos.....	55
5.1. Resultados Experimentales a temperatura constante.....	70
5.2. Resultados Experimentales a tiempo constante.....	73
5.3. Resultados Experimentales - arreglo ortogonal.....	76
5.4. Factores intersujetos – tiempo y temperatura.....	77
5.5. ANOVA – Condiciones adecuadas de Operación.....	77
5.6. Valores de aceite dieléctrico deteriorado.....	79
5.7. Valores de aceite dieléctrico regenerado.....	79
5.8. Estadísticos descriptivos.....	80
5.9. ANOVA – Parámetros de aceites dieléctricos.....	81
5.10. Factores Intersujetos – Tensión Interfacial Acidez Color.....	82
5.11. ANOVA – Método para Regenerar aceites dieléctricos.....	83

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se desarrolló un método para regenerar aceites dieléctricos utilizando tierra Fuller recuperada, el cual comprende diferentes etapas: Tratamiento de tierra Fuller contaminada con aceites dieléctricos con una tecnología Físico Química, para esta etapa se realizó un lavado con una solución de detergente comercial a 70°C y un secado a 75°C en horno por aire forzado por 10 horas continuas, obteniendo un material menos contaminante. La segunda etapa fue regenerar muestras de 3.40 L aceite deteriorado con muestras de 500 gr de tierra Fuller (50% nueva más 50% recuperada, 100 % recuperada y 75 % recuperada), mostrándonos mejores resultados las muestras de aceite dieléctrico que fueron regeneradas con muestras de tierra Fuller al 50% recuperada.

Para que un aceite dieléctrico se encuentre en óptimas condiciones para el buen funcionamiento de un transformador debe cumplir con los valores establecidos para la tensión Interfacial, la Acidez y el Color. Con el método desarrollado se obtuvo valores por encima de lo recomendado ( $> 25$  mN/m) de tensión Interfacial, siendo los más altos 38 y 39 mN/m; la Acidez más baja fue de 0.098 mgKOH/g; y la tonalidad de color más baja que se obtuvo fue de  $< 1.5$ , tanto la acidez y el color reportaron valores dentro de lo recomendado para aceites dieléctricos. Debido a los

resultados obtenidos se demuestra que el método utilizado es apropiado para volver a reutilizar tierra Fuller en mismo proceso de regeneración.

**Palabras clave:** aceites dieléctricos, regeneración, tierra Fuller, reutilización, tensión Interfacial.

## ABSTRAC

This research paper develop a method for regenerating dielectric oils using recovered earth Fuller. The way to do this involves three stages. First stage, treatment of Fuller contaminated earth with dielectric oils was made by Chemical-Physical technology. Thus, earth Fuller was washed with a solution of commercial detergent at 70 ° C and drying at 75 ° C in an oven by forced air for 10 continuous hours. The results obtained was a less polluting material. Next stage was to regenerate samples of 3.40 L deteriorated oil with samples of 500 gr of Fuller earth (50% new plus 50% recovered, 100% recovered and 75% recovered), showing better results the dielectric oil samples that were regenerated with samples Of land Fuller at 50% recovered.

In order to get a dielectric oil in optimal conditions for the proper operation of a transformer, it must comply with the values established for Interfacial tension: acidity and color. The developed method showed values of Interfacial tension above the recommended ( $> 25 \text{ mN / m}$ ), the highest of it was between 38 and 39  $\text{mN / m}$ ; the lowest Acidity was 0.098  $\text{mg KOH / g}$ ; and the lowest color tone obtained was  $<1.5$ , both the acidity and color reported values within the recommended values for dielectric oils. Due to the results obtained it is demonstrated that the method used is appropriate to reuse Fuller soil in the same regeneration process.

**Key words:** Dielectric oils, regeneration, Fuller earth, reuse, Interfacial tension.

## **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA**

### **1.1. Identificación de problema**

Hoy en día las empresas Industriales muestran poco interés por la disposición final del residuo que generan dentro de sus procesos; este es el caso de muchas de las empresas del rubro eléctrico, especialmente las que se dedican a servicios de mantenimientos de Transformadores.

Los transformadores contienen aceite dieléctrico para su funcionamiento, cuando estos aceites se encuentran deteriorados, ya no son aptos para el buen funcionamiento de los transformadores, por lo que se deriva a diferentes mantenimientos y tratamientos; uno de ellos, es el de Regeneración de aceites dieléctricos, sin embargo, para este proceso es indispensable el uso de Tierra Fuller, por ser un potente adsorbente de contaminantes polares. Luego de ser utilizada la Tierra Fuller pierde sus propiedades como regenerador de aceite, quedando como un material residual peligroso (MATPEL); debido a ello se plantea un método para la Regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada, para de esta forma prolongar la vida útil de este material dentro del mismo proceso, minimizando los impactos ambientales, de manera eficiente, segura y económica.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema General**

¿Cuál es el método adecuado que permite la regeneración de aceites dieléctricos con tierra Fuller reutilizada?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

- A. ¿Cuáles son las condiciones adecuadas que permitirán la regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada?
- B. ¿Cómo el método seleccionado para la regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada, demostrará su eficiencia?

## **1.3. Objetivos de la investigación**

### **1.3.1. Objetivo general**

Determinar un método para la regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- A. Determinar las condiciones adecuadas que permitirán la regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada.



- B. Demostrar que el método seleccionado para la regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada es eficiente.

#### **1.4. Justificación**

##### **1.4.1. Justificación tecnológica**

En el Perú en el sector eléctrico al realizar tratamientos a los aceites dieléctricos, generan gran cantidad de residuos peligrosos (MATPEL) como es el caso de la Tierra Fuller usada luego de una Regeneración de Aceites Dieléctricos, éstos no cuentan con un tipo de tratamiento alguno y generalmente se hace su disposición final, la cual consiste en incineración, provocando más impactos ambientales.

Al determinar un método, se prolonga la vida útil de la Tierra Fuller para ser nuevamente usada como regenerador de los aceites Dieléctricos para el uso de los Transformadores eléctricos.

##### **1.4.2. Justificación económica**

Actualmente las empresas del sector eléctrico en el país, realizan un solo uso de la Tierra Fuller para la regeneración de aceites dieléctricos, quedando como MATPEL. Para la regeneración de aceites generalmente por cada 45 galones de aceite se utiliza entre 25 y 50 kg de tierra Fuller (dependiendo del grado de envejecimiento del aceite), sin embargo, los Transformadores de mayor potencia, es decir de mayor tamaño, trabajan con un alto volumen de aceites dieléctricos y luego de

su regeneración producen gran cantidad de Tierra Fuller contaminada; por lo cual los costos son altos.

Mediante este método se trata a la tierra Fuller que ya ha sido usada en la Regeneración de aceites dieléctricos, para luego volver a utilizarla en el mismo proceso.

#### **1.4.3. Justificación ambiental**

En la actualidad las empresas que generan residuos provenientes del Rubro eléctrico, muestran poco interés por su disposición final; así es que la Tierra Fuller utilizada en la regeneración de aceites dieléctricos, se convierte en un MATPEL; en algunos casos los incineran y en muchos otros los dejan en huecos de depósito, con lo cual sigue causando impactos ambientales. Debido a ello, se propone una metodología apropiada que minimiza la contaminación ambiental que se genera con estos residuos, además se convierte en un método de disposición final.

#### **1.5. Importancia**

El trabajo de investigación es importante por lo siguiente:

- A. Tiene un aporte económico para las industrias, especialmente en los procesos que se involucran, minimizando los costos, ya que se reutilizará un producto que generalmente es desechado después de un proceso de Regeneración.

recuperar tierra Fuller contaminada con aceite dieléctrico que ha sido utilizada para regenerar al aceite dieléctrico que usan los Transformadores eléctricos.

La EPA (1996,) recomienda utilizar la técnica de extracción solvente para el tratamiento de suelos contaminados con sustancias peligrosas y compuestos persistentes, por ser eficiente, segura y económica y además posee una guía, llamado la guía del ciudadano para el tratamiento de suelos contaminados con sustancias peligrosas.

Hay que mencionar que todas estas investigaciones se centran sólo en cuanto al tema ambiental, a tratar la tierra Fuller como material o residuo peligroso, para minimizar su peligrosidad y a la vez evitar el impacto ambiental; sin embargo no se basan en la recuperación de tierra Fuller para ser reutilizado en el tratamiento de Regeneración de los aceites dieléctricos usados para el funcionamiento de los transformadores eléctricos.

**Beltrán et al. (2013)** reportaron un estudio sobre **“Tecnologías de Tratamiento para la Tierra Fuller contaminada con aceite dieléctrico”** en la Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín, Colombia. Los autores estudiaron los diversos tipos de tratamiento para

descontaminar a los suelos, y los emplearon para los tratamientos de Tierra Fuller contaminada con aceites dieléctricos.

Por lo tanto, aquí nos explican sobre las tecnologías Físico Química, en este tipo de tecnología se encuentra la extracción con solvente; esta técnica se fundamenta básicamente en transferir la sustancia de interés desde el sólido hasta el solvente empleado en el lavado, siendo una alternativa de tratamiento económica y comparada con otros tratamientos utilizados (Semer y Reddy, 1996).

Dentro de las Tecnologías Físico Química también se considera a la Oxidación Química (Procesos de Oxidación avanzada con ozono); Esta técnica involucra la combinación UV y la utilización de peróxido de hidrógeno para aumentar la generación de este radical; Dentro de los procesos de Oxidación también incluyó el Proceso Fenton, se realizó con una reacción fenton, el peróxido de hidrógeno es adicionado junto con una solución de un metal de transición ( $Fe^{+}$ ) para propiciar la formación de radicales  $+OH$  y lograr la oxidación de los compuestos difíciles de degradar (Ferrarese *et al.*, 2008); Además también consideró a otros oxidantes como, el peróxido de hidrógeno, el per sulfato de sodio activado, el permanganato de potasio y la combinación entre estos constituyen los agentes oxidantes más utilizados en la remediación de diferentes matrices sólidas (Brown *et al.*, 2002) y (Yen *et al.*, 2011).

de 1:8 p/v, y con una velocidad de agitación de 100 rpm, con un tiempo de 30 min. Las propiedades Físicas de la tierra Fuller recuperada fueron muy cercanas a las propiedades de la tierra Fuller nueva (densidad aparente de 0.641 g/ml, densidad real de 2.231 g/ml y una porosidad de 72.075 %).

En el caso de la Tecnología biológica, utilizaron un biorreactor biológico de tierra activada, para ello evaluaron la velocidad de agitación y el tiempo de degradación que era necesario según autor para alcanzar los niveles de descontaminación adecuados, para luego dispongan de un residuo que no implique riesgo para la salud y el ecosistema. Para este método el autor alcanzó una remoción de 49.68%, aunque para el autor no se alcanzó los niveles de limpieza exigidos por la resolución 1170 de 1997 del DAMA, Agudelo estaba conforme con el resultado, ya que creía que a altas concentraciones de hidrocarburos (superiores al 10%) son inhibitorias de la actividad biológica. Además hizo el seguimiento cromatográfico a 10 especies de hidrocarburos presentes en el aceite dieléctrico que son importantes dentro de este producto.

Los estudios realizados por el autor demostraron que hay efectividad en el método utilizado para descontaminar las Tierras Fuller usadas luego del proceso de Regeneración de aceites dieléctricos, considerándola como un método alternativo de Gestión ambiental y para su disposición final como residuo peligroso

**Durán y Contreras (2006)** evaluaron una **“Alternativa de Tratamiento para Tierras Fuller contaminadas con aceite dieléctrico”** en la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Se apoyaron en las bases de los estudios realizados en suelos contaminados con hidrocarburos. Los autores estudiaron cuatro métodos y procedimientos; de los cuales tres de ellos incluyen un lavado previo de Tierra Fuller con detergente y agua a diferentes temperaturas, y posterior a ello un proceso de biorremediación (tecnologías biológicas). Según los autores *Durán y Contreras* el método que obtuvo mayor porcentaje de remoción de TPH (73%), fue el que se realizó con un lavado previo a la tierra Fuller contaminada con una solución de detergente a 70°C, y posteriormente realizaron una biorremediación o biolabranza, utilizando material de volumen y nutrientes orgánicos; ya que este proceso disminuyó una cantidad de hidrocarburos desde 266720.75 mg/kg a 71574.47 mg/kg, lo que hace un 73.1% en reducción.

Los métodos que utilizaron en esta investigación, los autores, fueron desarrollados según los mismos métodos para suelos contaminados con hidrocarburos. Teniendo en cuenta que hay una diversidad de estudios para limpieza de suelos contaminados. Mostrando que la combinación de métodos también es una técnica

efectiva en cuanto a tratamientos de Tierras contaminadas con aceite dieléctrico.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Método de recuperación de Tierra Fuller**

#### **Método de Lavado**

El Método de Lavado de tierras es un tratamiento físico que consiste en adicionar una solución durante un tiempo, que en este caso es de una solución de detergente comercial, de tal manera que el contaminante pase a la fase acuosa y se desorba de las partículas de Tierra Fuller a las cuales está adherido (Durán y Contreras, 2006).

Evaluaron el método de lavado con agua y detergente comercial a diferentes temperaturas, encontrando que la mejor remoción de TPH fue de 70°C. Teniendo en cuenta diferentes parámetros como, el tiempo de lavado, el tiempo de reposo, y la temperatura de secado en la estufa.

### **2.2.2. Proceso de regeneración de aceites dieléctricos**

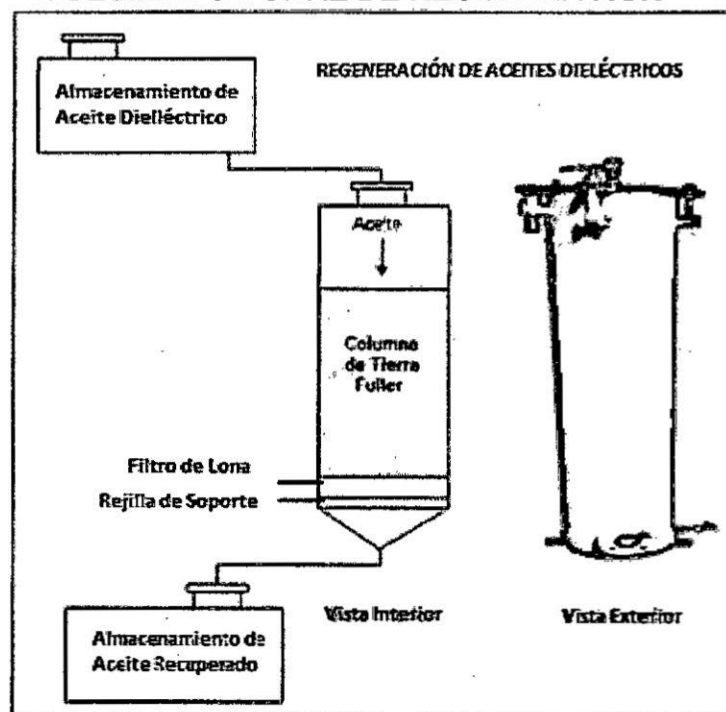
La Regeneración de Aceite Dieléctrico es una práctica que se utiliza mucho en la Industria de la Electricidad. El Tratamiento de Regeneración del aceite envejecido destaca, por su economía y facilidad de realización, al pasar del aceite a través de un lecho de Tierras adsorbentes, que en este caso es Tierra Fuller, que retienen los compuestos polares producidos por los procesos de oxidación. De modo

que su comportamiento en el seno del Transformador, sea prácticamente el mismo que el de un Aceite nuevo o, al menos, mejore en gran medida las propiedades deterioradas. A la vez que descontaminamos los devanados del Transformador de lodos y sustancias producidas por la oxidación (Baez y Erivan, 2012).

### Regeneración en columnas o torres

Actualmente la tendencia es el de regenerar utilizando filtros acondicionados con tierra Fuller suelta, con relleno manual y con abertura inferior para rápida descarga.

**FIGURA N° 2.1.  
COLUMNA O TORRE DE REGENERACIÓN**



FUENTE: Briones (2005)

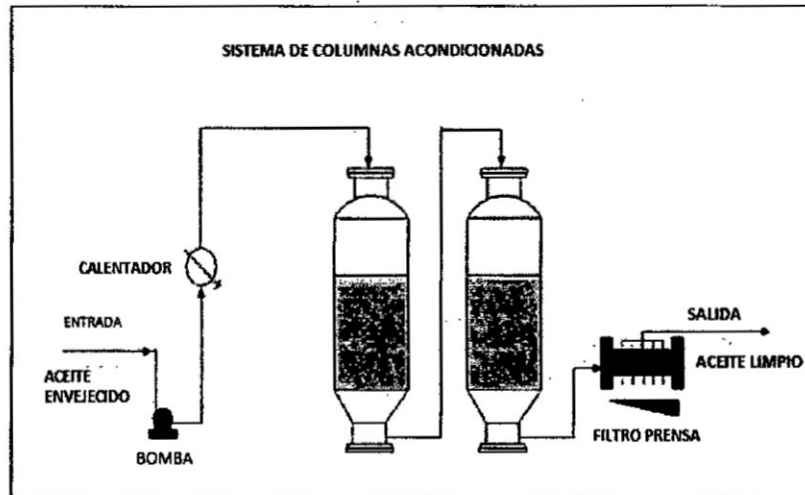


En la práctica, la capa de adsorbente debe tener una altura mínima de 4.5 m para columnas de hasta 1.5 m de diámetro. Para columnas cuyo diámetro excede los 1.5, la relación altura diámetro debe ser por lo menos 3 a 1. Para pruebas de evaluación la columna de regeneración debe tener una relación de altura a diámetro de 10 a 1. En general, para recuperar un galón de aceite, se necesitan aproximadamente 2.5 libras (1.13 Kg) de arcilla adsorbente (Briones, 2005).

Una vez que se ha llenado la columna con tierra Fuller, el aceite es transferido del tanque de almacenamiento contaminado o de un transformador, pasando por un calentador eléctrico que mantiene su temperatura a un nivel óptimo, e introducido finalmente a la cámara con tierra Fuller. El aceite a ser recuperado es primeramente calentado a una temperatura determinada para reducir su viscosidad y luego de esto es bombeado con presión hacia la parte superior de la primera torre o columna de arcilla adsorbente (Briones, 2005).

La calidad del aceite tratado puede ser vista a través de un visor de vidrio localizado al final del filtro. Una tapa de abertura en la parte inferior de la columna, facilita el retiro de la tierra Fuller saturada (Briones, 2005).

**FIGURA N° 2.2.**  
**SISTEMAS DE COLUMNAS ACONDICIONADAS PARA LA**  
**REGENERACIÓN**



FUENTE: Briones (2005)

En algunos casos, para un mejor aprovechamiento de la tierra Fuller, puede utilizarse un sistema de dos o más columnas comunicadas con tubería, y puede ser operado en paralelo, especialmente cuando la contaminación del aceite es baja, o en serie cuando se requiere un alto desprendimiento de acidez del aceite y por lo tanto la máxima utilización de la tierra Fuller.

### **2.2.3. Principio de tierra fuller**

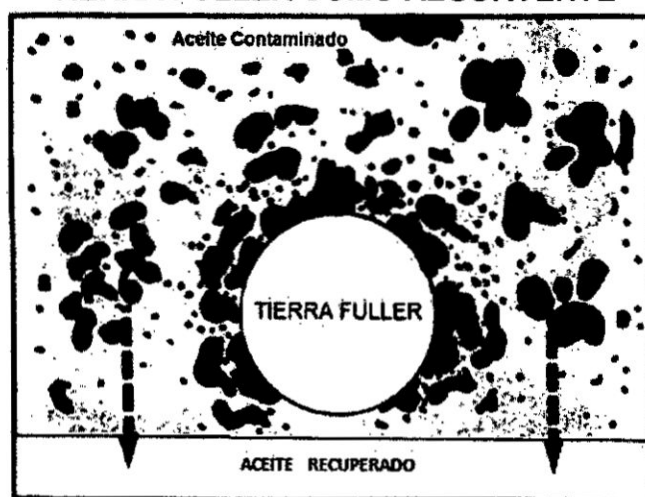
Los mecanismos de decoloración y purificación del aceite utilizan el principio de adsorción que se basa en la adherencia de moléculas o iones de cualquier especie a la superficie de un sólido. Mientras mayores sean las fuerzas de atracción y la superficie adsorbente, mayor es la capacidad de adsorción. La estructura de tierra Fuller activada es altamente porosa y

su superficie alcanza valores encima de los 100 m<sup>2</sup>/gramo. Las secuencias de capacidades de adsorción de diversos materiales por la tierra Fuller es la siguiente: agua alcoholes, ácidos, aldehídos, cetonas, olefinas N, neutros, aromáticos, cicloparafinas y parafinas (Briones, 2005).

La purificación del aceite con tierra fuller es un proceso complejo que incluye lo siguiente:

- Filtrado, que es la separación de pequeñas partículas sólidas.
- Adsorción, o factor principal en la purificación.
- Actividad catalítica, que causa reacciones formando productos que se absorben más rápidamente.

**FIGURA N° 2.3.  
TIERRA FULLER COMO ABSORVENTE**



FUENTE: Briones (2005)

a) Pruebas Físico Químicas de los aceites dieléctricos para el funcionamiento de Transformadores Eléctricos.

➤ Prueba de tensión interfacial (ASTM D-971)

La Tensión interfacial entre el aceite aislante y el agua, es una medida de la fuerza de atracción molecular entre las moléculas y se expresa en dinas por cm. La prueba proporciona un medio de detectar contaminantes polares solubles y productos de deterioro. Los contaminantes solubles y los productos de degradación del aceite, generalmente producen una baja tensión interfacial.

➤ Prueba de acidez (ASTM D-974)

Esta prueba es llamada también índice de acidez y es la prueba química más importante. Consiste en cuantificar el grado de oxidación del aceite que es la causa de la formación de ácidos que deterioran el sistema de aislamiento solido la pérdida de capacidad dieléctrica del aceite y la oxidación del núcleo magnético.

➤ Color (ASTM D-1500)

Esta Prueba cualitativa se expresa con un valor numérico y está basada en una comparación por luz transmitida del aceite con una serie de vidrios de color estándar.

No existe una correlación directa entre el cambio de color del aceite y un problema específico del equipo, sin embargo, los cambios de color proporcionan una indicación del deterioro y/o contaminación del aceite.

## **2.3. Marco conceptual**

### **2.3.1. Tierra fuller**

#### **a) Origen de tierra fuller**

La Tierra Fuller, Tierra de batán o tierra de batanero, es un agregado de arcilla, de aspecto terroso, blando, de grano fino, de color pardo verdoso, azulado o amarillento, compuesto principalmente de esmectita hinchable del tipo montmorillonita. La tierra de batán se distingue de la arcilla ordinaria por su escasa plasticidad; es además untuosa al tacto y se adhiere a la lengua. Se raya con la uña, y da raya brillante. No forma pasta con el agua; sumergida en ella se deslíe y deshace en polvo. Es muy absorbente, y tradicionalmente se ha empleado para desengrasar la lana y clarificar el aceite. En España se la llama también tierra jabonosa o tierra de Segovia, porque abunda en esta provincia. En Estados Unidos es conocida como tierra de Florida; y en Gran Bretaña con el nombre de Fuller's earth se designa un nivel del Jurásico medio del sur de la isla. Hacia el final del cuento "Puente de música, río de arena", de William

Goyen, incluido en La misma sangre y otros cuentos, se lee (en la traducción de Esther Cross): "La gente de ese pueblo pobre vivía en las afueras de un molino inmundo que le soplaba encima algo llamado Tierra Fuller, que era como talco. Esa sustancia estaba en los techos, en el suelo y en los pulmones. Olía agrio y hacía arder los ojos. (Jorge Ordaz, tomado noviembre 2016).

**FIGURA N° 2.4.  
TIERRA FULLER O TIERRA DE BATÁN**



FUENTE: <http://jorgeordaz.blogspot.pe/2011/06/tierra-de-batan.html>

El término tierra Fuller se refiere a una clase natural de arcilla adsorbente, cuyo principal constituyente es la arcilla atapulgita, la cual por años ha sido utilizada satisfactoriamente para recuperar aceites de transformador por su alta capacidad de absorción de compuestos polares y de clarificación de los mismos.

Lo que hace a la arcilla tan única es su estructura cristalina Mineralmente, la arcilla es encontrada como silicato de aluminio y magnesio.

## b) Propiedades de tierra fuller en la regeneración de aceites dieléctricos

Estas tierras tienen una gran capacidad de adsorción de moléculas ácidas generadas durante el proceso de degradación del aceite dieléctrico. Estas moléculas ácidas se producen durante el funcionamiento de los transformadores eléctricos, en donde el aceite se ve afectado por sobretensiones, rayos, calor, agua, celulosa, hierro, cobre, etc., las cuales actúan como agentes catalizadores que promueven la oxidación de los hidrocarburos que conforman el aceite dieléctrico. Las primeras sustancias polares que se forman son alcoholes y aldehídos, luego se forman las cetonas y posteriormente los ácidos orgánicos que reaccionan y a su vez forman los ésteres los cuales se activan y polimerizan aglomerándose y formando complejos moleculares de alto peso en forma de lodos que se depositan en los intersticios de la celulosa del papel, los devanados y radiadores del transformador. Estos lodos son los principales factores que ponen en grave riesgo de falla al transformador al afectar las propiedades aislantes de los aceites. Los mantenimientos con tierras Fuller se utilizan para retirar estos lodos y limpiar el aceite, las tierras Fuller usadas quedan con una importante carga contaminante. (Gallo, 2005).

C) Composición de la Tierra Fuller usada en la regeneración de aceites dieléctricos

Es una roca silícea sedimentaria, constituida principalmente de compuestos inorgánicos como silicatos, alúmina, hierro, tierras alcalinas, etc. La tierra Fuller es un compuesto extremadamente poroso; que posee baja conductividad de calor y electricidad, y es químicamente inerte; capaz de adsorber y retener gran cantidad de líquidos con los cuales tiene grandes superficies de contacto. (Agudelo, 2010).

**FIGURA N° 2.5.**  
**ESPECIFICACIONES DE ARCILLA ATALPULGUITA – ULTRA CLEAR**

<b>Producto: ULTRA CLEAR 30/60 – 30/60 I</b>					
<b>Atapulguita Montmorilonita: Composición Química</b>					
SiO <sub>2</sub>	70.85 %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.06 %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.34 %
CaO	1.62 %	MgO	5.71 %	K <sub>2</sub> O	1.30 %
SO <sub>3</sub>	0.03 %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.84 %	Otros	0.25 %
Propiedades: pH ( 5% sólido en D.I. H <sub>2</sub> O) 5.6 - 7.3					
Densidad: 33.0 - 33.9 lbs/ft <sup>3</sup> - Color: Gris					
Indicaciones de Uso: Purificación de aceites minerales					

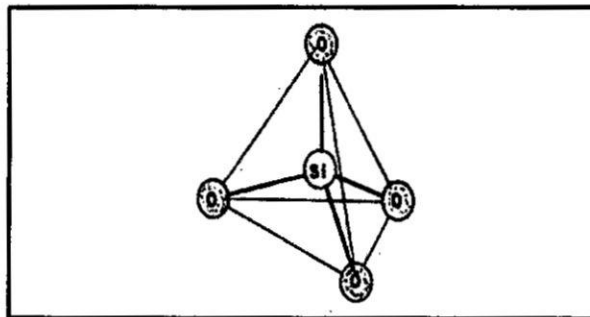
FUENTE: Ficha Técnica - Ultra Clear

La familia de los silicatos comprende la mayoría de los minerales de la corteza terrestre, incluido el cuarzo. Las arcillas son una rama de los silicatos y su formación obedeció a tres mecanismos principales: 1) por herencia, 2) por neo formación y 3) por transformación (Dominguez y Schifter, 2009). El primer mecanismo indica que el material arcilloso fue derivado directamente de una roca madre y es este tipo de arcillas el que predomina en los sedimentos de lagos y mares. Los otros dos



mecanismos implicaron una reacción química entre varios componentes o bien a partir de la arcilla original, por lo que este tipo de formación requirió de mayor energía y de ciertas condiciones hidrotérmicas. Una excelente propiedad de los aluminosilicatos como la tierra Fuller, es su posibilidad de sustituir el átomo de silicio (Si), por otro de menor carga como el aluminio ( $Al^{3+}$ ), generando así una deficiencia de carga positiva o un exceso de carga negativa en la molécula, para lo cual necesita atraer a otros cationes para compensarse, por ejemplo,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ , etc. Este es el mecanismo que permite a los silicatos tener propiedades superficiales únicas de acidez e intercambio iónico, (Domínguez y Schifter, 2009).

**FIGURA N° 2.6.  
ESTRUCTURA PIRAMIDAL DE LOS SILICATOS**



FUENTE:

[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/sec\\_6.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/sec_6.html)

### 2.3.2. Los aceites dieléctricos

Los aceites dieléctricos son derivados del petróleo utilizados en dispositivos eléctricos como transformadores, disyuntores, cables etc. En los transformadores cumplen una doble función:

- Llena los poros del aislamiento fibroso y los espacios entre los conductores de los devanados, entre éstos y el tanque del transformador elevando considerablemente la rigidez dieléctrica del aislamiento.
  - Mejora la extracción de calor que se desprende a causa de las pérdidas en el arrollamiento y el núcleo del transformador.

Si el aceite dieléctrico no cumple con estas funciones, el dispositivo puede quedar fuera de servicio ocasionando pérdidas económicas e interrupciones en el suministro de energía eléctrica (Rojo, 1997).

#### a) Composición química del aceite dieléctrico

Los aceites dieléctricos son una mezcla de hidrocarburos Parafínicos, Nafténicos y Aromáticos. Se ha encontrado que los aceites dieléctricos tienen mejores desempeños a concentraciones altas de hidrocarburos parafínicos y nafténicos y entre 4-8% de hidrocarburos aromáticos. (Agudelo, 2010).

Una composición típica de un buen aceite dieléctrico responde a las siguientes proporciones:

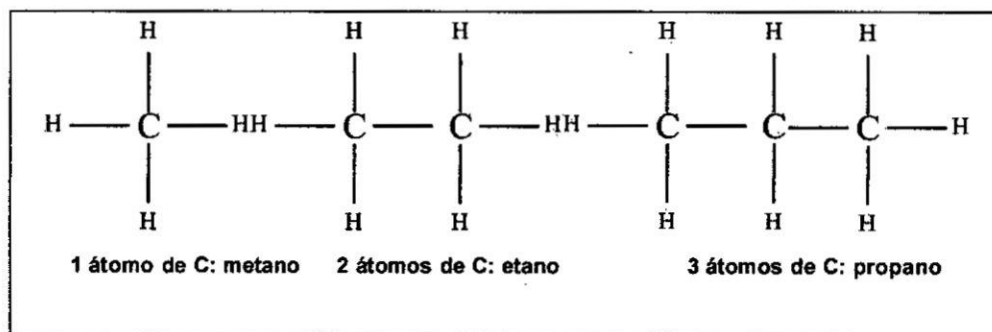
- Hidrocarburos Aromáticos: 4 a 7%
- Hidrocarburos Isoparafínicos: 45 a 55%

- Hidrocarburos Nafténicos: 50 a 60% .

Los aceites minerales representan el 90% del volumen de ventas de aceites dieléctricos a nivel mundial, casi todo usado en transformadores e interruptores de potencia. Una cantidad menor es usada en capacitores y cables.

Hidrocarburos Parafínicos. Responden a la fórmula:  $C_nH_{2n+2}$  y sus átomos de carbono están dispuestos según una cadena abierta recta. Son hidrocarburos saturados y a partir del butano, su denominación posee una raíz que indica el número de átomos de carbono y una terminación común ANO. Ejemplo:

**FIGURA N° 2.7.**  
**FÓRMULA QUÍMICA DE ALGUNOS HIDROCARBUROS PARAFÍNICOS**

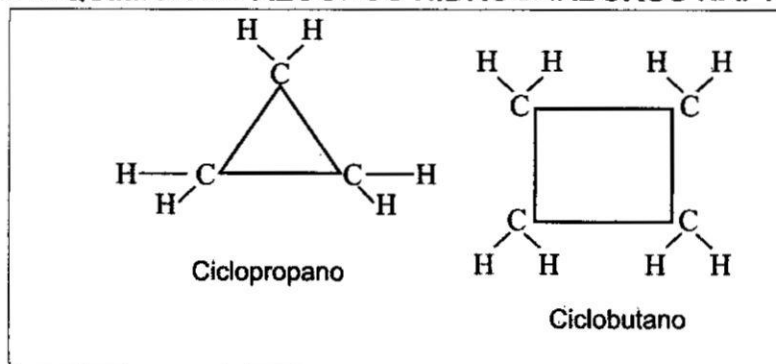


FUENTE: <http://www.galpenenergia.com>

Hidrocarburos Nafténicos. Son hidrocarburos saturados pero de cadena cerrada, denominándose con el prefijo CICLO. La fórmula general es:  $C_nH_{2n}$ .

FIGURA N° 2.8.

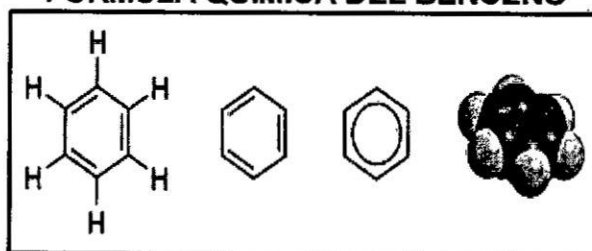
FÓRMULA QUÍMICA DE ALGUNOS HIDROCARBUROS NAFTÉNICOS



FUENTE: <http://www.galpenenergia.com>

Hidrocarburos aromáticos. Los hidrocarburos aromáticos o de serie bencénica son hidrocarburos no saturados de cadena cerrada, cuyo tipo característico es el benceno. Su fórmula es química general es:  $C_n H_{2n-6}$ .

FIGURA N° 2.9.  
FÓRMULA QUÍMICA DEL BENCENO



FUENTE: <http://www.galpenenergia.com>

Según la predominancia de un cierto tipo de hidrocarburo presente en un determinado aceite base (determinada por el origen del crudo), será su denominación parafínico o nafténico. En los aceites de base nafténicos, se encuentra menor porcentaje de cadenas parafínicas y mayores porcentajes de cadenas nafténicas y aromáticas. Comparando las propiedades de las bases

parafínicas con las de las bases nafténicas, a igual viscosidad, comprobamos que las parafínicas presentan ventajas en términos de mayor índice de viscosidad, menor volatilidad y mayor resistencia a la oxidación, mientras que las nafténicas tienen como características positivas, un punto de fluición más bajo, un mayor poder disolvente y una menor formación de residuos carbonosos. (Agudelo, 2010).

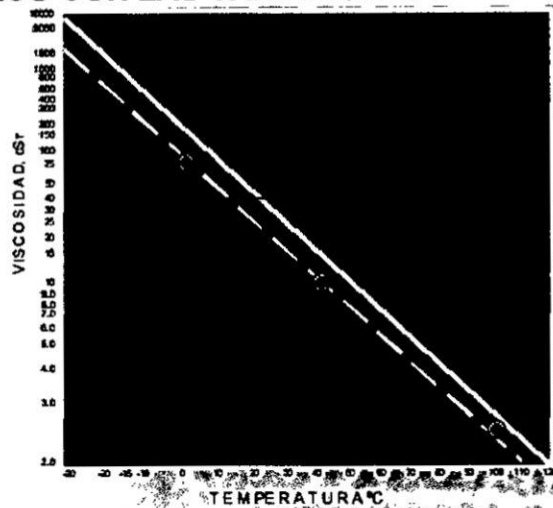
b) Propiedades físicas de aceites dieléctricos

➤ Viscosidad: la viscosidad de un fluido es la resistencia que dicho fluido presenta al moverse o deslizarse sobre una superficie sólida. Mientras más viscoso es el aceite, mayor será la resistencia que ofrecerá a moverse dentro del transformador y será menos efectiva su función de refrigeración.

Por esta razón, los aceites dieléctricos deben tener una baja viscosidad para facilitar la disipación del calor generado en la operación del transformador.

Las viscosidades máximas establecidas para aceites dieléctricos, a las diferentes temperaturas de evaluación, mediante el método ASTM D-445 o D-88, son: 3 cst a 100 °C; 12 cst a 40 °C y 76 cst a 0 °C. (www.brettis.com, noviembre 2016)

**FIGURA N° 2.10.**  
**COMPORTAMIENTO TÍPICO DE LA VISCOSIDAD DE UN ACEITE**  
**DIELÉCTRICO CON LAS VARIACIONES DE TEMPERATURA**



FUENTE: [www.brettis.com](http://www.brettis.com)

➤ **Punto de Fluidez:** Se define como la temperatura a la cual el aceite deja de fluir, mientras se somete a un proceso de enfriamiento progresivo. Este dato sirve para identificar diferentes tipos de aceites aislantes. Un punto de fluidez igual o mayor que 0°C indica la presencia dominante de hidrocarburos parafínicos, en tanto que puntos de fluidez del orden de -10 °C son propios de las fracciones de petróleo en las cuales predominan los hidrocarburos isoparafínicos. Las fracciones de hidrocarburos nafténicos tienen puntos de fluidez entre -20 a -35°C y las fracciones de hidrocarburos aromáticos llegan a tener puntos de fluidez del orden de los -40 a -60°C.

Puntos de fluidez aceptables para aceites dieléctricos evaluando mediante el método ASTM D-97, es de -40 °C a -50 °C. ([www.brettis.com](http://www.brettis.com), noviembre 2016)

➤ Tensión interfacial: conviene recordar que la solubilidad de un líquido en otro y también la viscosidad de ellos dependen, en buena parte, de su tensión superficial. Así, por ejemplo, cuando dos líquidos tienen una tensión superficial muy diferente son insolubles, tal como sucede con el aceite y el agua. Ahora bien, en la interface o superficie de contacto de dos líquidos insolubles, se sucede una interacción molecular que tiende a modificar la tensión superficial de ambos líquidos en la zona de contacto; en este caso se habla de tensión interfacial, la cual casi siempre es referida al agua, como patrón de comparación. Existen compuestos que se forman de la descomposición natural de los aceites dieléctricos de origen mineral, que son igualmente solubles tanto en el agua como en el aceite, modificando su tensión interfacial, causando un aumento considerable de la humedad de saturación del aceite y haciéndolo más conductor de la electricidad. La tensión interfacial mínima aceptada para aceites dieléctricos, evaluada por el método ASTM D-971, es de 40 dinas/cm. (www.brettis.com, noviembre 2016)

➤ Punto de Anilina: Temperatura a la cual un aceite dieléctrico se disuelve en un volumen igual de anilina. Sirve como parámetro de control de calidad, ya que un aceite dieléctrico con alto contenido de aromáticos disuelve la anilina a menor temperatura. Temperaturas de disolución entre 78 y 86 °C corresponden a un buen dieléctrico. El punto de anilina

aceptado para aceites dieléctricos, evaluado mediante el método ASTM D-611, es de 63 a 84°C. ([www.brettis.com](http://www.brettis.com), noviembre 2016)

**Color:** La intensidad de color del aceite dieléctrico depende de los tipos de hidrocarburos que predominen en dicho aceite. Así, por ejemplo, las fracciones parafínicas e isoparafínicas son blancas y transparentes, color agua. Las nafténicas varían de amarillo claro a amarillo verdoso. Las aromáticas poseen coloraciones que van desde el amarillo rojizo (naranja) al marrón oscuro. Para los aceites dieléctricos se ha fijado un color máximo de 0,5 (amarillo claro), buscando que el aceite sea predominantemente nafténico. El color se determina mediante el método ASTM D- 1500. ([www.brettis.com](http://www.brettis.com), noviembre 2016)

#### c) Propiedades químicas del aceite dieléctrico

**Estabilidad a la oxidación:** Los aceites dieléctricos, en razón de su trabajo, están expuestos a la presencia de aire, altas temperaturas y a la influencia de metales catalizadores tales como hierro y cobre, lo cual tiende a producir en el aceite cambios químicos que resultan en la formación de ácidos y lodos. Los ácidos atacan el tanque del transformador y reducen significativamente la capacidad aislante del aceite con las consecuentes pérdidas eléctricas. Los lodos interfieren en la transferencia de calor (enfriamiento), haciendo que las partes del transformador estén sometidas a más altas temperaturas, situación que también conduce a pérdidas de potencia eléctrica.



Como resulta obvio, es importante reducir al mínimo posible la presencia de estas sustancias perjudiciales (ácidos y lodos). Por esta razón es esencial el uso de aceites refinados que posean óptima resistencia a la oxidación y estabilidad química que garanticen amplios periodos de funcionamiento y alarguen la vida de los equipos (Rojo, 1997).

### **2.3.3. Transformadores eléctricos en la industria**

Los transformadores son equipos encargados de convertir un voltaje de entrada en otro voltaje de salida. Los transformadores se encuentran presentes tanto en la generación de energía eléctrica como en su transmisión y distribución. También, su uso se extiende al campo de las comunicaciones y en aplicaciones domésticas. El papel que desempeñan es de gran importancia económica debido a las graves consecuencias que pueden derivarse de la falla de estos equipos. En su forma más simple, un transformador consiste en un núcleo de hierro dulce que lleva en dos regiones del mismo dos enrollados o devanados que constituyen los circuitos primario y secundario. El circuito de devanado que recibe la potencia eléctrica es el primario, y el devanado secundario es el encargado de entregarla a una red exterior. En el esquema superior, se observan las tres partes mencionadas ([www.brettis.com](http://www.brettis.com), noviembre 2016).

a) Deterioro del aceite dieléctrico en Transformadores Eléctricos

La vida de un equipo eléctrico que dependa del aceite dieléctrico, está condicionada a la vida del sistema aislante.

**FIGURA N° 2.11.  
ACEITE EN FUNCIÓN DE SU TEMPERATURA DENTRO DE  
UN TRANSFORMADOR**

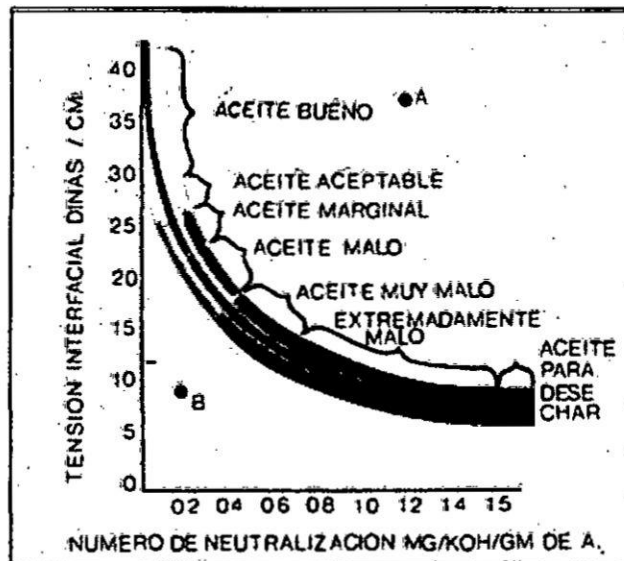
<b>VIDA ÚTIL DEL ACEITE EN FUNCIÓN DE SU TEMPERATURA</b>	
<b>Temperatura</b>	<b>Vida Útil del Aceite</b>
60° C	20 años
70° C	10 años
80° C	5 años
90° C	2.5 años
100° C	1.2 años
110° C	0.5 años

FUENTE: Briones (2005)

La mayoría de los transformadores, por ejemplo, usan sistemas de aislamiento líquido (aceite de dieléctrico) y aislamiento sólido (papel Kraft, papel prensado, madera y productos de celulosa). Un gran porcentaje de las fallas presentadas en los transformadores se atribuyen a fallas en dicho sistema de aislamiento. Al envejecer el aceite dieléctrico se pone más oscuro y dentro de él se forman impurezas (ácidos y resinas) una parte de las cuales es soluble en el aceite y la otra insoluble, que es más pesada y sedimenta en el fondo del tanque y sobre las piezas sumergidas en el aceite, formando una capa de lodo que dificulta la extracción de calor de los elementos que se calientan. Los ácidos de bajo peso molecular que se

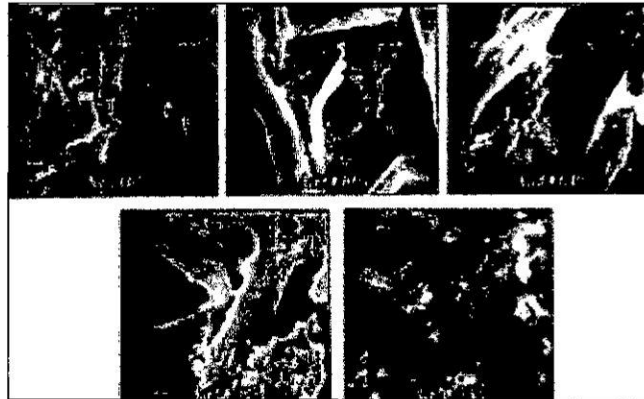
forman en el aceite estropean el aislamiento de los devanados del transformador, y provocan la corrosión de los metales que están en contacto con él. Con el envejecimiento aumenta la viscosidad y el índice de rigidez dieléctrica y disminuyen sus propiedades dieléctricas. La velocidad de envejecimiento del aceite dieléctrico aumenta por la presencia de aire, ya que su envejecimiento depende de la oxidación por el oxígeno, si la temperatura se eleva, si el aceite está en contacto con ciertos metales como: cobre, hierro, plomo u otras sustancias catalizadoras, por la acción de la luz, por la acción del campo eléctrico y por los choques mecánicos. (Agudelo, 2010).

**FIGURA N° 2.12.  
CLASIFICACIÓN DE ACEITES DIELECTRICOS**



FUENTE: Briones (2005)

**FIGURA N° 2.13.  
FOTOS MICROSCÓPICAS DE ACEITE CON  
DISTINTOS GRADOS DE ACIDEZ**



FUENTE: Briones (2005)

#### **2.4. Definiciones de términos**

**a) Contaminantes polares**

Aquellos compuestos en el que el enlace entre sus elementos se realiza por transferencia de electrones de la capa más externa de uno de ellos a la del otro.

**b) Detergente**

Sustancia que tiene la propiedad química de disolver la suciedad o las impurezas de un objeto sin corroerlo.

**c) MATPEL**

Material peligroso es toda sustancia sólida, líquida o gaseosa que por sus características físicas, químicas o biológicas puede ocasionar daños a los seres humanos, al medio ambiente y a los bienes.

**d) Nafténicos**

Hidrocarburo saturado constituido por uno o más anillos de átomos de carbono. También se denominan cicloparafinas o parafinas de cadena cerrada.

**e) Parafínicos**

Es un tipo de líquido derivado del petróleo crudo parafínico, con una elevada parte de la cadena recta saturada de los hidrocarburos.

**f) Tensión Interfacial**

Es una propiedad de la interfaz entre dos fases inmiscibles. Cuando ambas fases son líquidas se denomina tensión Interfacial.

**g) Transformador Eléctrico**

Los transformadores son equipos encargados de convertir un voltaje de entrada en otro voltaje de salida.

**a) Escenario de la Investigación**

La investigación tiene como escenario a la empresa Electro Regsa s.a.c., con la finalidad de aprovechar el material peligroso que generan luego de una regeneración de aceites dieléctricos, las instalaciones de planta, así como también el laboratorio de análisis Físico Químico; y el laboratorio de Tesis de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

**b) Modelo de Diseño de Investigación**

El diseño presenta las siguientes etapas de investigación:

- ✓ En la primera etapa de investigación se reunieron toda la información bibliográfica, los antecedentes de estudio y las bases científicas. Se procedió a realizar el método a emplear; que consiste en lavar tierra Fuller contaminada a 70 °C con una solución acuosa al 0.2 % en peso de detergente comercial; y posteriormente un secado a 75 °C, en un horno por aire forzado.
  
- ✓ En la segunda etapa de investigación, se realizó el montaje e instalación del equipo de Regeneración, se puso en marcha el proceso de regeneración de aceite dieléctrico con tierra Fuller reutilizada, obtenida luego de la primera etapa.

Se tomó una pequeña muestra del aceite dieléctrico deteriorado (500 ml) y se le realizó unas pruebas previas en laboratorio para verificar el estado con el que ingresa al proceso, luego se hizo pasar este aceite por la columna de regeneración que contiene el adsorbente ya preparado y tratado. A una temperatura constante se extrajo pequeñas muestras en intervalos de tiempo, y luego con un tiempo constante de proceso y a diferentes temperaturas se extrajo nuevamente pequeñas muestras de aceite, para ser analizadas en laboratorio, y para así poder evaluar las condiciones óptimas de operación.

- ✓ En la tercera etapa de investigación, luego de evaluar las condiciones óptimas de operación se realizó las corridas experimentales según el modelo experimental diseñado "taguchi"; para así, encontrar el mejor método para regenerar aceites dieléctricos con tierra Fuller reutilizada.

**c) Determinar las variables de diseño**

Se utilizará información científica relevante, para cuantificar los indicadores de las principales variables.

estudiar el efecto de varios factores, en la cual tendremos tres niveles y tres variables.

En donde:

A= Temperatura de Operación (°C):

Siendo: 80 (nivel 1), 90 (nivel 2), 100 (nivel 3)

B= Tiempo de Operación (min):

Siendo: 3 (nivel 1), 5 (nivel 2), 7 (nivel 3)

C= Porcentaje de Tierra Fuller reutilizada (gr):

Siendo:

50% nueva / 50% reutilizada (nivel 1)

25% nueva / 75% reutilizada (nivel 2)

0% nueva / 100% reutilizada (nivel 3)

**TABLA N° 4.1.  
DISEÑO EXPERIMENTAL**

N° Exp.	VARIABLES			VECTOR DE RESPUESTA		
	a	b	c	TIF	Acidez	Color
1	1	1	1	-	-	-
2	1	2	2	-	-	-
3	1	3	3	-	-	-
4	2	1	2	-	-	-
5	2	2	3	-	-	-
6	2	3	1	-	-	-
7	3	1	3	-	-	-
8	3	2	1	-	-	-
9	3	3	2	-	-	-

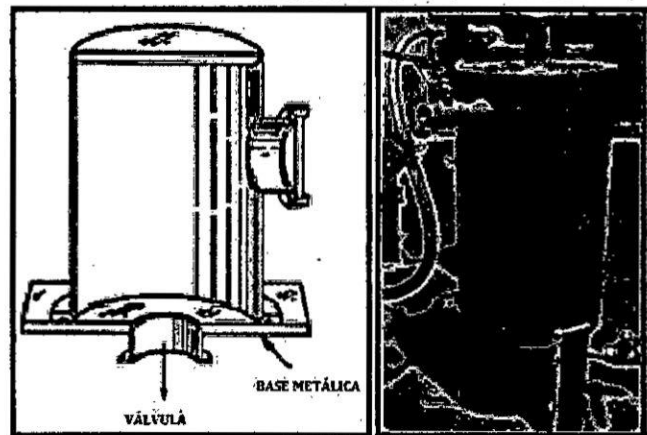
Fuente: elaboración propia



los extremos de la cámara cilíndrica son convenientemente cerrados con placas bombeadas de metal.

La capacidad de un cilindro para no colapsarse por la presión externa depende de su diámetro, espesor de las paredes, y la firmeza del material. La superficie tiene un pintado de base epóxica y acabado.

**FIGURA N° 4.4.  
DISEÑO DE EQUIPO GENERADOR**



Fuente: Empresa Electro Regsa

#### **Descripción de Filtro de Lana y Malla Metálica**

En la base inferior de los cilindros, se encuentran ubicados unos elementos filtrantes como discos de malla de aluminio a los cuales se les adiciona papel filtro o filtro de lana con agujeros, la microfiltración se da a 5 Micras, con ésta es capaz de eliminar carbón, lodos o cualquier microtícula sólida que se encuentre en suspensión.

### **Descripción de la calefacción cilíndrica – Resistencias Tubular de inmersión**

Las resistencias tubulares son varios elementos tubulares soldados en una placa, tapón roscado o brida, por necesitarse calor directo se calentará con intercambiadores de calor con tres o cuatro bancos de resistencias en acero inoxidable controlable, cada una con su respectivo control digital de temperatura.

#### **4.3.2. Equipos, materiales y reactivos**

Se utilizaron los siguientes equipos y materiales para la investigación:

**TABLA N° 4.2.  
LISTA DE EQUIPOS Y MATERIALES**

<b>EQUIPOS Y MATERIALES</b>	<b>UND.</b>
Equipo de Regeneración	1
Equipo de Tensión Interfacial	1
Horno	1
Bandeja de metal	1
Estufa	1
Colorímetro	1
Bureta de 5 y 10 ml	2
Balanza analítica	1
Termómetro	2
Densímetro	1
Vasos de Precipitado de 100 ml	10
Vasos de Precipitado de 50 ml	20
Matraz de Erlenmeyer de 150 ml	10
Probeta de 500 ml	1
Rollo de papel aluminio	1
Caja de bolsas herméticas	1
Envases Esterilizados para extracción de muestras	18

Fuente: Elaboración propia

Para realizar la presente investigación y obtener los resultados deseados se emplearon los siguientes insumos y reactivos:

**TABLA N° 4.3.  
LISTA DE REACTIVOS E INSUMOS**

<b>INSUMOS Y REACTIVOS</b>	<b>Peso</b>	<b>Volumen</b>
Agua destilada		4 L
Detergente	1 KG	
Tierra Fuller usada	20 KG	
Aceite dieléctrico deteriorado		110 L
Tolueno		1.65 L
Acetona		0.05 L
Alcohol isopropílico		1.60 L
Indicador alfa-naftol		0.05L
Hidróxido de Potasio 0.10 N		0.10 L

Fuente: Elaboración propia

#### **4.4. Desarrollo Experimental**

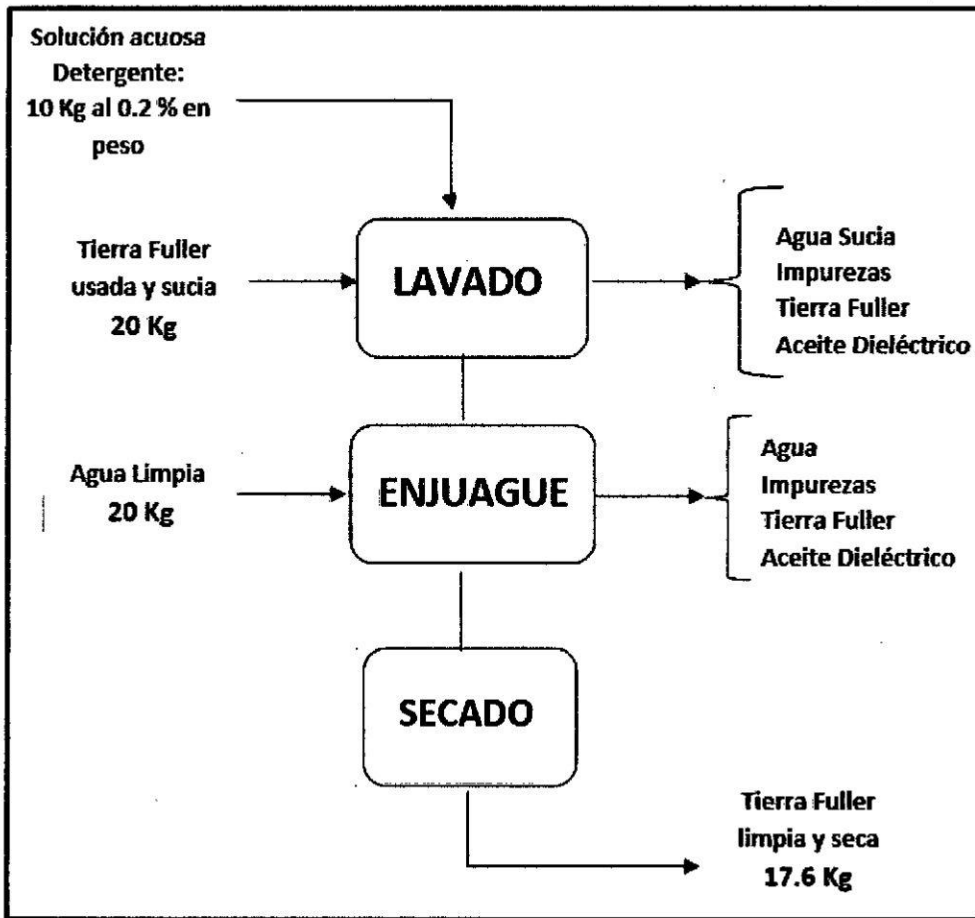
##### **4.4.1. Balance de materia**

Para el balance de materia se tuvo en cuenta los procesos que intervienen en esta investigación, como:

➤ **Proceso de preparación de muestra limpia**

Se ha pesado un total de 20 Kg de tierra Fuller usada y sucia, obtenida luego de un proceso de regeneración, para que luego de estar limpia y seca contemos con muestras homogéneas. Según el esquema:

**FIGURA N° 4.5.  
BALANCE DE MATERIA DE PREPARACIÓN DE LA MUESTRA**



Fuente: Elaboración propia

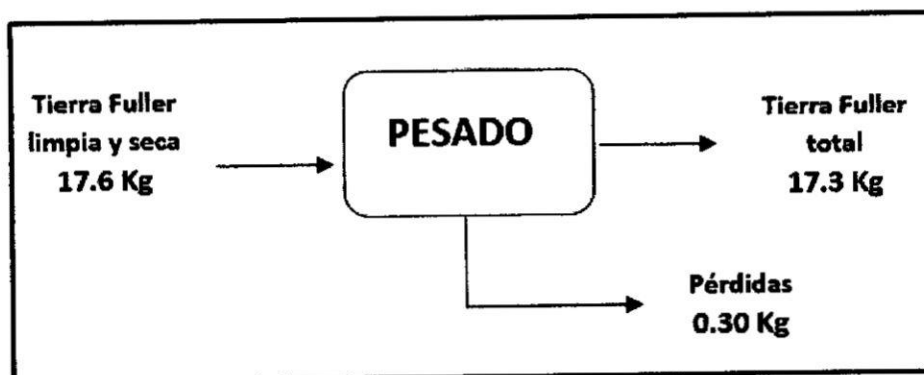
La tierra Fuller limpia y seca luego del proceso de lavado, de enjuague y de secado, pesó en total 17.6 Kg. Obteniéndose como pérdidas en peso de 2.4 Kg en referencia al peso original, debido a que durante todo el proceso en mención; especialmente en el lavado y enjuague al salir agua sucia también sale aceite dieléctrico que se encontraba adherido a las partículas de tierra Fuller; y además de que en el secado también se obtuvo unas pequeñas pérdidas de tierra Fuller propiamente dicha.

➤ **Proceso de pesado y envasado de muestras de tierra fuller a utilizar en todas las corridas experimentales**

Los 17.6 Kg de tierra Fuller obtenida en el proceso anterior, fueron distribuidos de la siguiente manera: se separó pesando 5 muestras de 500 gr (100% reutilizada) y 5 muestras de 250 gr (50% reutilizada); para realizar las corridas experimentales a temperatura constante, variando los tiempos; de la misma manera se pesó 9 muestras de 500 gr (100% reutilizada) y 9 muestras de 250 gr (50% reutilizada); para realizar las corridas experimentales a tiempo constante, variando la temperatura. Esto se realizó para hallar las condiciones óptimas de operación (temperatura y tiempo).

Luego se pesó 6 muestras de 500 gr (100% reutilizada), 6 muestras de 250 gr (50% reutilizada) y 6 muestras de 375 gr (75% reutilizada); para las corridas experimentales según el diseño experimental, que fueron por duplicado.

**FIGURA N° 4.6.  
BALANCE DE MATERIA DE PESADO DE MUESTRA**



Fuente: Elaboración propia

Durante el proceso de regeneración, se pierde aproximadamente 10% de aceite dieléctrico (Electro Regsa, 2016); ya que, al retirar la tierra Fuller, ésta no sale sola, si no con una cantidad de aceite y además de impurezas, provenientes de los lodos ácidos formados dependiendo del grado de envejecimiento del aceite.

Este proceso se realizó para cada muestra de Tierra Fuller de 500 gr. en total, ya sea al 100% de tierra Fuller lavada, al 50% y al 75 %.

#### **4.4.2. Tratamiento de materia prima**

##### **a. Preparación de la Solución de detergente**

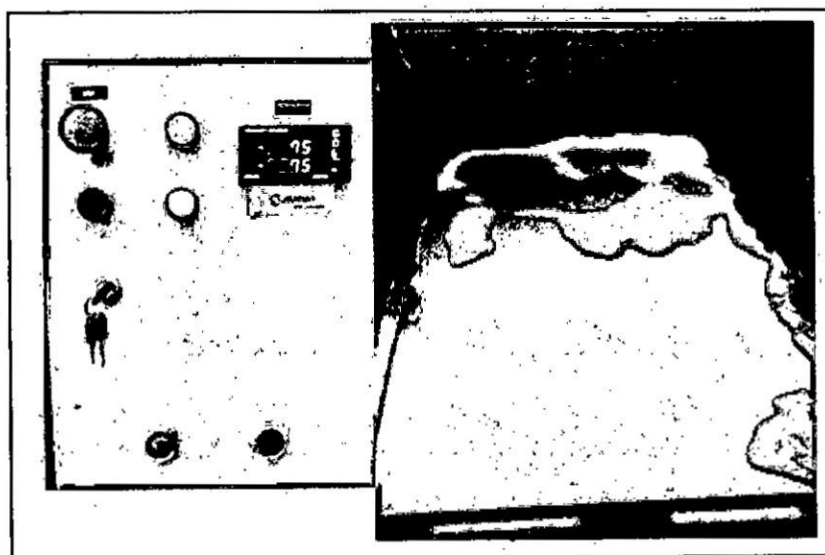
Se preparó 10 Kilos al 0.2% en peso de solución de detergente a 70 °C; cuya relación fue de 20 g de detergente por cada 100 gr de agua caliente.

##### **b. Preparación de la muestra de tierra Fuller limpia**

- Se ha pesado 20 Kg de tierra Fuller usada luego de un proceso de regeneración de aceites dieléctricos que la empresa Electro Regsa almacena como material residual.
- Se colocó en una bandeja de metal, y luego se vertió la solución de detergente ya preparada a 70°C, para lavar la tierra Fuller.

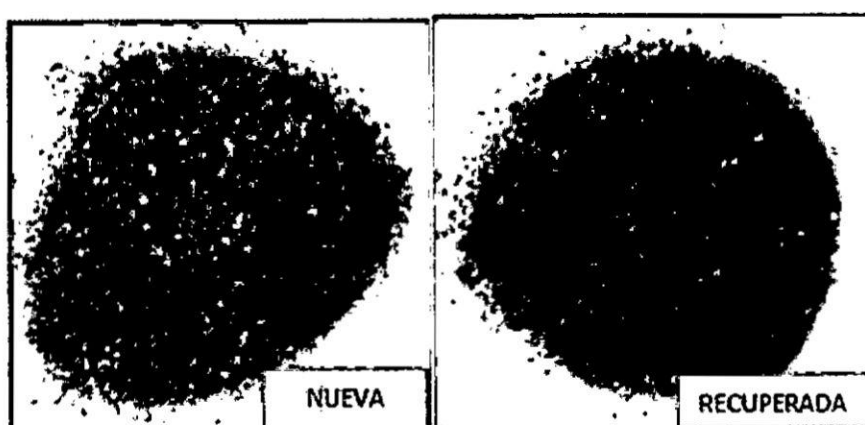
- Se realizó el lavado manualmente con mucho cuidado, utilizando guantes de cuero para apaciguar la temperatura y sobre ellos se utilizó guantes de nitrilo (recomendados para el manejo de sustancias químicas - NTP 748).
- Se enjuagó dos veces a la muestra para evitar restos de detergentes y gotas de aceite sobrenadante.
- Se escurrió bien la muestra, eliminando al máximo el líquido para un buen secado homogéneo.
- Luego se secó la muestra de tierra Fuller lavada y enjuagada, en un horno por aire forzado a una temperatura constante de 75°C, por un lapso de 10 horas continuas

**FIGURA N° 4.8.**  
**PROCESO DE SECADO DE TIERRA FULLER EN HORNO**



Fuente: elaboración propia

**FIGURA N° 4.9.  
IMÁGENES DE TIERRA FULLER**



Fuente: elaboración propia

**c. Preparación y separación de muestras**

Por cada 500 gr de muestra de tierra Fuller se regenera 3.40 Litros de aceite dieléctrico.

- Se pesó y separó 32 muestras de 500 gr de tierra Fuller cada una, en bolsas herméticas y previamente rotuladas; diferenciando las muestras que son al 100 %, al 50 % y al 75 % tierra lavada.
- Se separó 32 muestras de 3.40 Litros de aceite dieléctrico deteriorado, de una misma población de muestra, que es un cilindro de aceite almacenado para regenerar.



- Se realizó el calentamiento de este aceite a la temperatura de operación para cada muestra, dentro del tanque calentador, ésta temperatura fue marcada en el termómetro.
- Luego el aceite pasó al tanque o columna regeneradora, y se controló para cada muestra el tiempo así como también la temperatura, según las corridas experimentales para ver las condiciones de operación, así como también los experimentos del diseño experimental.
- Por último se extrajo pequeñas muestras de aproximadamente ½ litro por la válvula de muestreo, para que éstas sean analizadas en laboratorio según los parámetros establecidos para aceites dieléctricos luego de un proceso de regeneración.

#### **4.4.4. Obtención del producto final – aceite dieléctrico regenerado**

Las muestras extraídas por la válvula de extracción del equipo de regeneración mostraron una tonalidad más clara a las muestras originales, la cual es uno de los indicadores que los aceites dieléctricos fueron regenerados, llegando a obtener hasta una tonalidad de < 1.5, muy cerca de lo que sería una tonalidad transparente (< 0.5).

tiempo. Los cuales fueron evaluados y monitoreados de la siguiente manera:

- Para hallar el tiempo óptimo de operación se hizo constante la temperatura (65°C – temperatura de operación a nivel industrial); y se realizó 10 corridas experimentales, de las cuales 5 se trabajaron con muestras al 100 % de tierra Fuller lavada y las otras 5 se trabajaron con muestras al 50% de tierra Fuller lavada más 50% de tierra Fuller nueva.
- Para hallar la temperatura óptima de operación, se realizó en forma similar que el paso anterior pero en este caso se hizo constante el tiempo (tiempo medio de 4.5 min), para lo cual fueron 18 corridas experimentales, 9 se trabajaron con muestras al 100 % de tierra Fuller lavada y 9 con muestras al 50 % de tierra Fuller lavada más 50% de tierra Fuller nueva.
- Luego se realizaron 9 experimentos con réplica de acuerdo al diseño experimental, en la cual actúan en forma conjunta el tiempo, la temperatura y el % de tierra Fuller reutilizada.

#### **4.4.6. Procedimiento de pruebas de laboratorio**

Las pruebas que se realizaron en laboratorio fueron 3 principalmente: la tensión interfacial, la tonalidad (color) y la acidez.

- Primero se evaluó la densidad de cada muestra de aceite dieléctrico, para luego proceder con la prueba de tensión interfacial. Esta prueba se realizó

en un Equipo Tensiómetro, pero para ello fue necesario conocer la densidad del agua (0.998 g/ml), ya que ésta se ingresa como dato en el equipo para proceder a realizar la prueba de tensión interfacial del agua destilada, la cual debe reportar un valor de 70 dinas/cm (70 mN/m); esto se realizó como un blanco antes de cada prueba de tensión interfacial de los aceites dieléctricos.

a. Para la Prueba de Tensión Interfacial se procedió de acuerdo a la norma ASTM D - 971:

- En un vaso de precipitado de 100 ml se agregó 80 ml de agua destilada,
- Luego se limpió el anillo de platino marca cruz (instrumento que realiza la prueba) y se sumergió en dos vasitos de solventes, primero por acetona y luego por tolueno, y se colocó el anillo dentro del tensiómetro.
- Se ingresó manualmente en el tensiómetro la densidad del agua destilada, se taró y finalmente se lanzó la prueba, luego de obtener el resultado de la tensión Interfacial del agua se procedió a realizar la prueba para el aceite dieléctrico.
- Se agregó 10 ml de la muestra de aceite dieléctrico encima de los 80 ml de agua destilada, llegando a un volumen total de 90 ml.
- Nuevamente se limpió el anillo sumergiendo en los solventes ya mencionados y se colocó en el tensiómetro.
- Se ingresó manualmente en el equipo la diferencia de las densidades entre el agua destilada y el aceite, se taró y se lanzó la prueba.

- Se apuntó todos los valores que nos reportó el equipo tensiómetro, saliendo valores mucho más altos que el de la muestra inicial.

Todo este procedimiento de la prueba de tensión Interfacial se realizó para todas las muestras obtenidas de los experimentos realizados.

- b. Para la prueba de acidez se realizó de acuerdo a la norma ASTM D – 974:

Se necesitó una bureta de 5 ml, un soporte metálico, solución de KOH 0.01 N, indicador alfa-naftol y reactivo – solvente (ya preparado anteriormente).

- Se colocó una bureta de 5 ml en un soporte metálico
- Se pesó 20 gr de aceite dieléctrico en un matraz de 50 ml.
- Luego se agregó 100 ml del reactivo – solvente preparado, para cada muestra.
- Se agregó 10 gotas del indicador alfa-naftol, el cual deja a la muestra en un color ámbar.
- Se agregó una solución de KOH 0.01 N a la bureta para valorar.
- Luego se fue valorando gota a gota hasta que vire desde un color ámbar hasta un color verde botella.
- Se apuntó los gastos obtenidos y se halló el porcentaje de acidez con la siguiente fórmula:

$$Acidez = \frac{(Vg - Blanco)}{Wmuestra} * factor$$

## CAPÍTULO V: RESULTADOS

### 5.1. Resultados para las condiciones óptimas de operación

El trabajo experimental se llevó a cabo en tres etapas acorde al proyecto, según lo mencionado en la metodología.

Para hallar las condiciones óptimas de operación, se realizó las siguientes corridas experimentales, a temperatura constante:

**TABLA 5.1.  
RESULTADOS EXPERIMENTALES A TEMPERATURA CONSTANTE**

N° Exp.	VARIABLES		VECTOR DE RESPUESTA					
	W(g) muestra total	T = Cte = 65°C	TIF ASTM D-971		Acidez ASTM D-974		Color ASTM D-1500	
			Aceptable > 25		Aceptable < 0.1		Aceptable < 3.5	
t(min) = Vle	100%TLv	50%TLv 50%TLn	100%TLv	50%TLv 50%TLn	100%TLv	50%TLv 50%TLn		
1	500	1 min	28	31	0.020	0.017	< 3.0	< 2.5
2	500	3 min	32	34	0.014	0.013	2.5	2.0
3	500	5 min	34	35	0.013	0.012	< 2.5	< 2.0
4	500	7 min	36	37	0.011	0.010	2.0	1.5
5	500	9 min	37	37	0.010	0.011	2.0	1.5

Fuente: elaboración propia

Según los resultados se obtuvo gráficas de Tensión Interfacial versus tiempo, tanto al 100 % de Tierra Lavada como al 50% de Tierra Lavada.

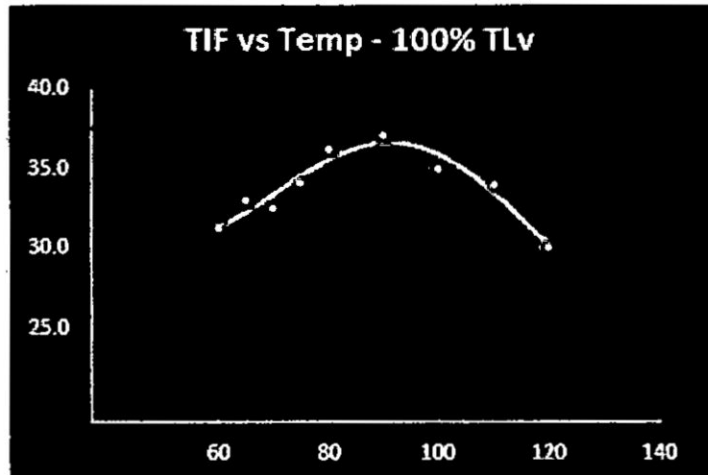
**TABLA 5.2.  
RESULTADOS EXPERIMENTALES A TIEMPO CONSTANTE**

N° Exp.	VARIABLES		VECTOR DE RESPUESTA					
	W(g) muestra total	t(min) = Cte. = 4.5	TIF ASTM D-971		Acidez ASTM D-974		Color ASTM D-1500	
			Acceptable > 25		Acceptable < 0.1		Acceptable < 3.5	
T(°C)= Vle	100%TLv	50%TLv 50%TLn	100%TLv	50%TLv 50%TLn	100%TLv	50%TLv 50%TLn		
1	500	60	31.2	30.2	0.017	0.017	< 2.5	2.0
2	500	65	33.0	33.2	0.015	0.016	< 2.5	2.0
3	500	70	32.5	33.9	0.016	0.014	2.0	< 2.0
4	500	75	34.1	35.0	0.014	0.012	2.0	< 2.0
5	500	80	36.2	37.4	0.012	0.010	< 2.0	1.5
6	500	90	37.0	39.0	0.010	0.0098	< 2.0	< 1.5
7	500	100	35.0	35.8	0.012	0.012	2.0	< 2.0
8	500	110	34.0	34.4	0.014	0.013	< 2.5	< 2.0
9	500	120	30.0	32.1	0.018	0.015	2.5	2.5

Fuente: elaboración propia

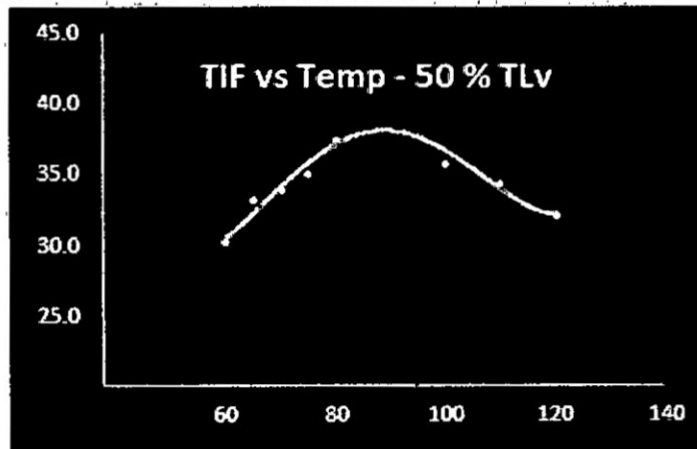
Según los resultados se obtuvo gráficas de Tensión Interfacial versus Temperatura, tanto al 100 % de Tierra Lavada como al 50% de Tierra Lavada.

**GRÁFICO 5.5.**  
**TENSIÓN INTERFACIAL VS TEMPERATURA AL 100 % TLV**



Fuente: elaboración propia

**GRÁFICO 5.6.**  
**TENSIÓN INTERFACIAL VS TEMPERATURA AL 50 % TLV**



Fuente: elaboración propia

Según los resultados se obtuvo gráficas de Acidez versus temperatura, tanto al 100 % de Tierra Lavada como al 50% de Tierra Lavada.

**TABLA 5.3.**  
**RESULTADOS EXPERIMENTALES - ARREGLO ORTOGONAL**

N° Exp.	VARIABLES			VECTOR DE RESPUESTA		
	a	b	c	TIF	Acidez	Color
1	80	3	50/50	34.80	0.012	< 2.0
2	80	5	25/75	32.80	0.014	< 2.0
3	80	7	0/100	33.70	0.013	< 2.0
4	90	3	25/75	33.70	0.013	< 2.0
5	90	5	0/100	35.50	0.011	1.5
6	90	7	50/50	38.00	0.0098	1.5
7	100	3	0/100	37.00	0.010	1.5
8	100	5	50/50	37.20	0.010	< 1.5
9	100	7	25/75	36.00	0.011	1.5
10	80	3	50/50	35.00	0.012	< 2.0
11	80	5	25/75	32.60	0.014	< 2.0
12	80	7	0/100	33.80	0.013	< 2.0
13	90	3	25/75	33.70	0.013	< 2.0
14	90	5	0/100	35.60	0.011	1.5
15	90	7	50/50	38.40	0.0098	1.5
16	100	3	0/100	36.30	0.010	1.5
17	100	5	50/50	37.00	0.010	< 1.5
18	100	7	25/75	36.00	0.011	1.5

Fuente: elaboración propia

La interpretación estadística se ha realizado utilizando el estadígrafo de contraste ANOVA, ya que se requiere comparar dos medias en relación a las variables independientes: Temperatura y tiempo de operación.

Para el cálculo del estadístico del ANOVA se utilizó el software estadístico SPSS versión 21 para las variables que interfieren. El nivel de confianza fue de 95%, siendo el nivel de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ); teniendo como  $H_a: u_1 \neq u_2 \neq u_3$  y  $H_o: u_1 = u_2 = u_3$ ; donde:  $u_1 =$  Promedio temperatura y  $u_2 =$  Promedio tiempo.



**TABLA 5.4.**  
**FACTORES INTER-SUJETOS**

		N
	80	6
Temperatura	90	6
	100	6
	3	6
Tiempo	5	6
	7	6

Fuente: elaboración propia

**TABLA 5.5.**  
**ANOVA – CONDICIONES ADECUADAS DE OPERACIÓN**

Origen	Variable dependiente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	P Sig.
	TIF	3,778 <sup>a</sup>	8	,472	8,500	,002
Modelo corregido	Acidez	3,778 <sup>b</sup>	8	,472	8,500	,002
	Color	4,444 <sup>c</sup>	8	,556		
Intersección	TIF	46,722	1	46,722	841,000	,000
	Acidez	46,722	1	46,722	841,000	,000
	Color	37,556	1	37,556		
Temperatura	TIF	2,111	2	1,056	19,000	,001
	Acidez	,778	2	,389	7,000	,015
	Color	,444	2	,222		
Tiempo	TIF	,111	2	,056	1,000	,405
	Acidez	,111	2	,056	1,000	,405
	Color	1,778	2	,889		
Temperatura * Tiempo	TIF	1,556	4	,389	7,000	,008
	Acidez	2,889	4	,722	13,000	,001
	Color	2,222	4	,556		
Error	TIF	,500	9	,056		
	Acidez	,500	9	,056		
	Color	,000	9	,000		
Total	TIF	51,000	18			
	Acidez	51,000	18			
	Color	42,000	18			
Total corregida	TIF	4,278	17			
	Acidez	4,278	17			
	Color	4,444	17			

a. R cuadrado = ,883 (R cuadrado corregida = ,779)

b. R cuadrado = ,883 (R cuadrado corregida = ,779)

c. R cuadrado = 1,000 (R cuadrado corregida = 1,000)

De acuerdo a la tabla anterior, el valor de F obtenido para el modelo es un indicio que el modelo propuesto es significativo; y valores de  $P < 0.05$  indican términos significantes.

Según los cálculos obtenidos en el SPSS Versión 21, se obtuvieron valores de P menores a 0.05 en temperatura y temperatura - tiempo, mostrando su significancia; sin embargo el tiempo por sí solo obtuvo un valor de P mayor a 0.05; observando que la temperatura y el tiempo en conjunto inciden en el proceso de regeneración de aceites dieléctricos.

El estadístico  $R^2$  mide la proporción de la variabilidad total explicada por el modelo. El  $R^2$  corregida está acorde al tamaño del modelo, sin embargo podría decrecer si se agregan términos poco significantes del modelo. En este caso ambos estadísticos son significativos para el modelo.

## **5.2. Resultados de los parámetros de aceites dieléctricos**

El trabajo experimental se llevó a cabo en tres etapas acorde al proyecto, según lo mencionado en la metodología.

Los parámetros de los aceites dieléctricos a considerar son: Tensión Interfacial, Acidez y Color.

Promedio Tensión Interfacial,  $u_2$  = Promedio Acidez y  $u_3$  = Promedio de colores.

**TABLA 5.8.**  
**ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS**

TIF	Acidez	Color	Media	Desviación estándar	N	
25 - 30	0.0098 - 0.015	<0.5 - <2	1,0000	,00000	3	
		2 - 3.5	1,0000	.	1	
		Total	1,0000	,00000	4	
	0.016 - 0.08	<0.5 - <2	1,5000	,70711	2	
		2 - 3.5	2,6667	,57735	3	
		Total	2,2000	,83666	5	
	Total	<0.5 - <2	1,2000	,44721	5	
		2 - 3.5	2,2500	,95743	4	
		Total	1,6667	,86603	9	
	30 - 39	0.0098 - 0.015	<0.5 - <2	1,0000	.	1
			2 - 3.5	2,0000	.	1
			Total	1,5000	,70711	2
0.016 - 0.08		<0.5 - <2	3,0000	,00000	2	
		2 - 3.5	2,6667	,57735	3	
		3,00	3,0000	,00000	2	
		Total	2,8571	,37796	7	
Total		<0.5 - <2	2,3333	1,15470	3	
		2 - 3.5	2,5000	,57735	4	
		3,00	3,0000	,00000	2	
		Total	2,5556	,72648	9	
Total		0.0098 - 0.015	<0.5 - <2	1,0000	,00000	4
	2 - 3.5		1,5000	,70711	2	
	Total		1,1667	,40825	6	
	0.016 - 0.08	<0.5 - <2	2,2500	,95743	4	
		2 - 3.5	2,6667	,51640	6	
		3,00	3,0000	,00000	2	
		Total	2,5833	,66856	12	
		Total	<0.5 - <2	1,6250	,91613	8
		2 - 3.5	2,3750	,74402	8	
		3,00	3,0000	,00000	2	
		Total	2,1111	,90025	18	

Fuente: elaboración propia

### 5.3. Resultados del método para la regeneración de aceites dieléctricos

El trabajo experimental se llevó a cabo en tres etapas acorde al proyecto, según lo mencionado en la metodología. Se evaluó el mejor método para regenerar aceites dieléctricos con tierra Fuller reutilizada, según las corridas experimentales y siguiendo el diseño experimental ya mencionado (Véase la tabla N° 5.2, en la página "63"), obtenemos los siguientes datos estadísticos, que se han realizado utilizando el estadígrafo de contraste ANOVA, ya que se requiere comparar más de dos medias en relación a la variable dependiente.

Para el cálculo del estadístico del ANOVA se utilizó el software estadístico SPSS versión 21 para las variables que interfieren. El nivel de confianza fue de 95%, siendo el nivel de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ); teniendo como  $H_a: u_1 \neq u_2 \neq u_3$  y  $H_o: u_1 = u_2 = u_3$ ; donde:  $u_1$  = Promedio Tensión Interfacial en relación al % de tierra Fuller reutilizada,  $u_2$  = Promedio Acidez en relación al % de tierra Fuller reutilizada y  $u_3$  = Promedio de colores en relación al % de tierra Fuller reutilizada.

**TABLA 5.10.**  
**FACTORES INTER-SUJETOS**

		Etiqueta de valor	N
TIF	1	25 - 30	8
	2	30 - 39	10
Acidez	1	0.0098 - 0.015	6
	2	0.016 - 0.08	12
Color	1,00	<0.5 - <2	12
	2,00	2 - 3.5	6

**TABLA 5.11.**  
**ANOVA-MÉTODO PARA REGENERAR ACEITES DIELECTRICOS**

Origen	Variable dependiente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	P Sig.
Modelo corregido	Método 1 25/75	1,619 <sup>a</sup>	7	0,231	0,803	0,603
	Método 2 1/100	1,563 <sup>b</sup>	7	0,223	0,775	0,622
	Método 3 50/50	3,421 <sup>c</sup>	7	0,489	5,701	0,007
Intersección	Método 1 25/75	2,552	1	2,552	8,857	0,014
	Método 2 1/100	3,856	1	3,856	13,384	0,004
	Método 3 50/50	3,134	1	3,134	36,565	0,000
TIF	Método 1 25/75	0,291	1	0,291	1,009	0,339
	Método 2 1/100	0,360	1	0,360	1,251	0,290
	Método 3 50/50	0,004	1	0,504	6,043	0,009
Acidez	Método 1 25/75	0,099	1	0,099	0,345	0,570
	Método 2 1/100	0,030	1	,030	0,104	0,754
	Método 3 50/50	0,630	1	,630	7,348	0,022
Color	Método 1 25/75	0,465	1	,465	1,613	0,233
	Método 2 1/100	0,291	1	,291	1,009	0,339
	Método 3 50/50	0,839	1	,839	9,783	0,011
TIF * Acidez	Método 1 25/75	0,552	1	,552	1,915	0,197
	Método 2 1/100	0,465	1	,465	1,613	0,233
	Método 3 50/50	0,630	1	,630	7,348	0,022
TIF * Color	Método 1 25/75	0,360	1	,360	1,251	0,290
	Método 2 1/100	0,099	1	,099	0,345	0,570
	Método 3 50/50	0,630	1	,630	7,348	0,022
Acidez * Color	Método 1 25/75	0,065	1	,065	0,225	0,646
	Método 2 1/100	0,013	1	,013	0,043	0,839
	Método 3 50/50	0,004	1	,004	0,043	0,839
TIF * Acidez * Color	Método 1 25/75	0,030	1	,030	0,104	0,754
	Método 2 1/100	0,552	1	,552	1,915	0,197
	Método 3 50/50	0,004	1	,004	0,043	0,839
Error	Método 1 25/75	2,881	10	,288		
	Método 2 1/100	2,881	10	,288		
	Método 3 50/50	,857	10	,086		
Total	Método 1 25/75	9,000	18			
	Método 2 1/100	10,000	18			
	Método 3 50/50	7,000	18			
Total corregida	Método 1 25/75	4,500	17			
	Método 2 1/100	4,444	17			
	Método 3 1/100	4,278	17			

a. R cuadrado = ,360 (R cuadrado corregida = -,088)

b. R cuadrado = ,352 (R cuadrado corregida = -,102)

c. R cuadrado = ,800 (R cuadrado corregida = ,659)

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a la tabla anterior, el valor de F obtenido para el modelo es un indicio que el modelo propuesto es significativo; y valores de  $P < 0.05$  indican términos significantes.

Según los cálculos obtenidos en el SPSS Versión 21, se obtuvieron valores de P menores a 0.05 en Tensión Interfacial, acidez y color para el Método 3 cuyo porcentaje de Tierra Fuller reutilizada es 50 % y 50 % Tierra Fuller nueva, mostrando su significancia; sin embargo, los otros métodos en su mayoría presentan valores de P mayores a 0.05 indicándonos poca significancia.

El estadístico  $R^2$  mide la proporción de la variabilidad total explicada por el modelo. El  $R^2$  corregida está acorde al tamaño del modelo, sin embargo podría decrecer si se agregan términos poco significantes del modelo. En este caso ambos estadísticos son significativos para el modelo.

## **CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **6.1. Contraste de hipótesis con el resultado**

#### **a) Hipótesis General**

**Ho:** El método adecuado para la regeneración de aceites dieléctricos con tierra Fuller reutilizada, no consistiría en la mezcla de 50% tierra Fuller reutilizada con 50% Tierra Fuller nueva.

**Ha:** El método adecuado para la regeneración de aceites dieléctricos con tierra Fuller reutilizada, consistiría en la mezcla de 50% tierra Fuller reutilizada con 50% Tierra Fuller nueva.

Los resultados muestran que al utilizar el método de 50 % tierra Fuller reutilizada con 50 % tierra Fuller nueva para regenerar aceites dieléctricos deteriorados, luego de su regeneración éstos presentaron los valores más altos de Tensión Interfacial, valores bajos en acidez, y tonalidades de color más bajas; comprobando la hipótesis alterna demostrando la hipótesis General.

#### **b) Hipótesis Específica 1**

**Ho:** Las condiciones adecuadas que permitirían la regeneración de aceites dieléctricos con tierra Fuller reutilizada, no serían: Temperatura y tiempo de operación.

**Ha:** Las condiciones adecuadas que permitirían la regeneración de aceites dieléctricos con tierra Fuller reutilizada, serían: Temperatura y tiempo de operación.

- En la tabla 5.2 (página 73), los resultados muestran que la temperatura influye en el proceso de regeneración, siendo 90 °C la temperatura donde se obtiene la mejor regeneración de aceites dieléctricos.
- En la tabla 5.1 (página 70), los resultados muestran que el tiempo influye en el proceso de regeneración de aceites dieléctricos, siendo a 7 min el tiempo máximo de regeneración.
- En la tabla 5.3 (página 76), los resultados muestran que la temperatura y el tiempo influyen en forma conjunta en el proceso de regeneración, demostrándonos que a 90 °C y a 7 min se obtuvieron mejores resultados de regeneración de aceites dieléctricos. Por tanto se comprueba la hipótesis alterna demostrando la hipótesis específica.

#### c) Hipótesis Específica 2

**Ho:** El método seleccionado para la regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada no demostrará su eficiencia, cumpliendo con los parámetros recomendados para los aceites dieléctricos: Tensión interfacial – Acidez – Cartilla de colores (colorímetro).

**Ha:** El método seleccionado para la regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada demostrará su eficiencia, cumpliendo con los parámetros recomendados para los aceites



## 6.2. Contrastación con otros estudios similares

Los principales antecedentes considerados en la presente tesis, desarrollaron sus estudios teniendo como vector de respuesta al porcentaje de remoción de hidrocarburos totales, siendo uno de sus principales objetivos limpiar a la tierra Fuller contaminada con aceites dieléctricos (tratarla) para evitar los impactos ambientales por ser un material peligroso, obteniendo buenos resultados.

Cabe mencionar que esta investigación ha complementado a los antecedentes mencionados, ya que no sólo se realizó un tratamiento a la tierra Fuller como un material peligroso; si no que se ha vuelto a utilizar en su mismo proceso como material adsorbente y regenerador.

En el estudio realizado por el Ingeniero Beltrán et al. (2013) sobre **“Tecnologías de Tratamiento para la Tierra Fuller contaminada con aceite dieléctrico”** reportaron como tecnología Físico Química, el uso de surfactantes para tratar tierra Fuller contaminada; ya que se utilizó en suelos contaminados con hidrocarburos.

Peng et al. (2011) utilizaron el surfactante Triton X-100 y el Tween 80 en el lavado de un suelo contaminado con los PAH, obteniendo una remoción del 83% y 78% respectivamente. El surfactante Triton X-100 presentó un tiempo de lavado mayor en 30 minutos al logrado con el otro surfactante bajo las mismas condiciones.

En la presente investigación con el uso de un tensoactivo (detergente comercial) se llegó a remover cierta cantidad de

## CONCLUSIONES

- Se determinó un método para la regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada, consistiendo en utilizar 50% de tierra Fuller nueva con 50 % de tierra Fuller recuperada; ya que con esta proporción en el proceso de regeneración, se obtiene los mejores resultados para aceites dieléctricos, y que estos a su vez mantengan en óptimas condiciones a los transformadores en funcionamiento.
- Para el proceso de regeneración de aceites dieléctricos es importante considerar y controlar la temperatura y el tiempo, ya que las condiciones adecuadas de operación se dieron a 90°C y a 7 min; y que al pasar los 90° C de temperatura los aceites empiezan a deteriorarse nuevamente.
- El método seleccionado para la regeneración de aceites dieléctricos con tierra Fuller reutilizada es eficiente y permite que los aceites cumplan con los valores de los parámetros establecidos para aceites dieléctricos.
- Los aceites regenerados con el método empleado presentaron los mejores resultados: valores de Tensión Interfacial  $> 25$  mN/m (ASTM D – 971), valores de Acidez  $< 0.05$  (ASTM D – 974), y tonos de Color  $< 3.5$  (ASTM D – 1500).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUDELO ÉDISON. **Un Método de Gestión Ambiental adecuado para el tratamiento y la disposición final de un residuo peligroso: tierra Fuller contaminada con aceite Dieléctrico**, Tesis presentada para optar al título de M.Sc. en Medio Ambiente y Desarrollo por la Universidad de Colombia, 2010.
- ASTUDILLO MUÑOZ JUAN C. **Análisis Técnico Económico para la Reparación o Reemplazo de Transformadores de Potencia**. Tesis para la Obtención del Título de Ingeniero eléctrico. Escuela Politécnica Nacional. Enero 2008.
- ASTM D971, American Society for Testing and Materials, **Standard Test Method for Interfacial Tensión of Oil Against Water by the Ring Method**, 1-3, United States. 2004.
- ASTM D974, American Society for Testing and Materials, **Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration**, 1-7, United States. 2012.
- ASTM D1500, American Society for Testing and Materials, **Standard Test Method for Color of Petroleum Products**, 1-5, United States. 2007.
- BAEZ ERICK A., ERIVAN PERAZA. **Regeneración del Aceite Electroaislante con Tierra Fuller**. Tesina para acreditar la experiencia

educativa laboral en Ingeniería Mecánica. Universidad Veracruzana. Febrero 2012.

- BELTRAN ÓSCAR, BERRÍO LINDA, AGUDELO ÉDISON, CARDONA SANTIAGO. **Tecnologías de tratamiento para la Tierra Fuller contaminada con aceite dieléctrico.** Informe Revista EIA, Colombia, 2013.
- BIBLIOTECA DIGITAL. **Qué son las Arcillas.** [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/sec\\_6.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/sec_6.html). Tomado el 15 de Noviembre del 2016.
- BRIONES MARTÍNEZ MARÍA G.. **Análisis Técnico y económico de la recuperación de los aceites dieléctricos con Tierra Fuller y Desludificación de bobinados en Transformadores.** Tesis para Obtener el Título de Ingeniero en Electricidad. Escuela Superior del Litoral. 2005.
- BROWN G. S., BARTON L. L., THOMSON, B. M.. **Permanganate oxidation of sorbed polycyclic aromatic hydrocarbons.** Waste Management, Vol. 23, No. 8. 737-740. 2002.
- CERÓN ANDRÉS F., ECHEVERRY DIEGO F., APONTE GUILLERMO, ROMERO ANDRÉS A.. **Índice de Salud para Transformadores de Potencia Inmersos en Aceite Mineral con Voltajes entre 69 kV y 230 kV usando Lógica Difusa.** IEE-UNSJ-CONICET. Vol. 26(2), 107-116. 2015.

- DOMINGUEZ J., SCHIFTER I.. **Las arcillas: el barro noble.** <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/arcillas.html>. Consultado el 18 de octubre de 2016.
- DOUGLAS C. MONTGOMERY. **Diseño y Análisis de Experimentos.** Editorial Limusa s.a. de CV. Grupo Noriega Editores, Bladeras 95, México. 2004
- DURAN RINCON M., CONTRERAS C. **Alternativa de Tratamiento para Tierras Fuller contaminadas con Aceite dieléctrico.** Scientia et Technica Año XII, N°32. Vol. 6: 419 – 424. 2006.
- ESPINEL ELIANA LINDSAY. **Recuperación de la Bentonita, utilizada en el proceso de filtrado de aceites vegetales y su aplicación en la eliminación de los principales cationes metálicos contenidos en las aguas residuales provenientes de los Talleres de galvanoplastia.** Tesis para obtener el Título de Química. Universidad Industrial de Santander. 2008.
- FERRARESE, ANDREOTTOLA, GIANNI, OPREA, IRINA A.. **Remediation of PAH-contaminated sediments by chemical oxidation.** Journal of Hazardous Materials, Vol. 152. 128-139. 2008.
- GALLO E. **Diagnóstico Y Mantenimiento De Transformadores En Campo.** Transequipos, 2005.
- JACKSON, M. **Análisis Químico del Suelo.** Barcelona-España. Ed. Omega 1964.

- MONTGOMERY, D. **Diseño y Análisis de Experimentos.** Ed. Limusa-Wiley, México reimpr. 2006.
- ODAZ JORGE. **Tierra de Batán, La fuller's earth.** <http://jorgeodaz.blogspot.pe/2011/06/tierra-de-batan.html>. Consultado el 20 de Noviembre del 2016.
- REIS TENAJAS PEDRO. **Análisis del envejecimiento del aceite de un transformador mediante Espectroscopía Dieléctrica medida en baja frecuencia.** Universidad Carlos III de Madrid – Escuela Politécnica Superior. 2009.
- ROJO CLARA R. **Calidad Del Aceite Dieléctrico Utilizado En Transformadores.** Dyna 122 1997.
- SEMER R., REDDY K. **Evaluation of soil washing process to remove mixed contaminants from sandy loam.** Journal of Hazardous Materials, Vol. 45. 45-57. 1996.
- VALLEJO, V. SALGADO, L. ROLDAN, F. **Evaluación de la Bioestimulación en la Biodegradación de TPHs en Suelos Contaminados con Petróleo.** Revista Colombiana de Biotecnología. Vol. VII No. 2. Diciembre 2005.
- VIÑAS CANALS MARC. **Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica.** Tesis para optar al título de Doctor en Biología por la Universidad de Barcelona. Abril de 2005.

- YEN CHIA-HSIEN, CHEN KU-FAN, KAO CHIH-MING, LIANG SHU-HAO, CHEN TING-YU. **Application of persulfate to remediate petroleum hydrocarboncontaminated soil: Feasibility and comparison with common oxidants.** Journal of Hazardous Materials, Vol. 186. 2097-2102. 2011.

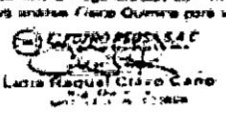
## ANEXOS

### Anexo 1: Matriz de consistencia

MÉTODO PARA LA REGENERACIÓN DE ACEITES DIELECTRICOS CON TIERRA FULLER REUTILIZADA						
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Dependiente	Indicadores	Dimensiones	Métodos y Técnicas
¿Cuál es el método adecuado que permite la regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada?	Determinar un método para la Regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada.	El método adecuado para la regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada, consistiría en la mezcla de 50% Tierra Fuller reutilizada con 50% Tierra Fuller no utilizada.	X = Regeneración de Aceites Dieléctricos	Tensión Interfacial Acidez Cartilla de colores (colorímetro)	Propiedades Físico -Química	Revisión Bibliográfica Análisis de Laboratorio
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variable Independiente	Indicadores	Dimensiones	Métodos y Técnicas
¿Cómo el método seleccionado para la regeneración de aceites dieléctricos con tierra Fuller reutilizada, demostrará su eficiencia?	Demostrar que el método seleccionado para la regeneración de aceites dieléctricos con tierra fuller es eficiente.	El método seleccionado para la regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada demostrará su eficiencia, cumpliendo con los parámetros recomendados para los aceites dieléctricos: Tensión interfacial – Acidez – Cartilla de colores. (Colorímetro).	Y = Método escogido	1. % de Tierra Fuller reutilizada	1. Cantidad	Método Experimental Método del lavado
¿Cuáles son las condiciones adecuadas que permitirán la regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada?	Determinar las condiciones adecuadas que permitirán la regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada.	Las condiciones adecuadas que permitirán la regeneración de aceites dieléctricos con Tierra Fuller reutilizada, serían: Temperatura y tiempo de operación.	Z = Condiciones adecuadas	1. Temperatura (°C) 2. Tiempo (minutos)	1. Variables	1. Bibliografía 2. Experimentos

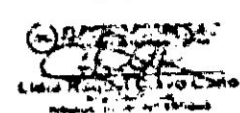


### Anexo 3: Protocolo de análisis físico químico de aceites dieléctricos

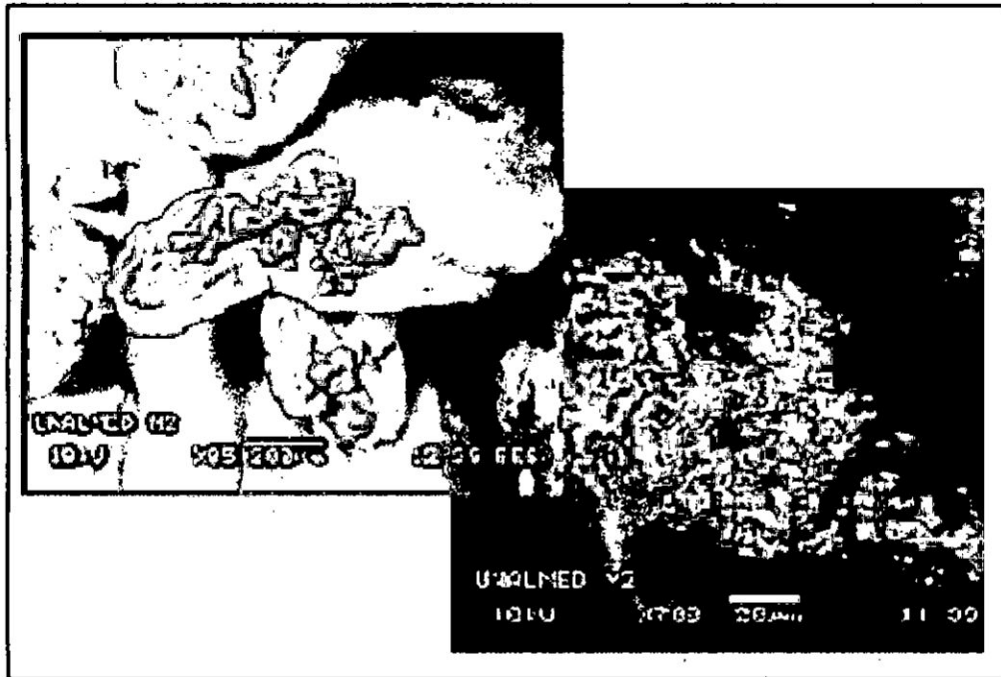
DATOS DEL MUESTRO				
CLIENTE:	ONG INGENIERÍA Y SERVICIOS TÉCNICOS S.A.S	FORMA DE MUESTRO:	11688017	
UBICACIÓN:	BOGOTÁ	TENSION:	1000 KV	
SUBSTANCIA:	MOBILGA	POTENCIA:	1000 KVA	
CLASE DE EQUIPO:	TRANSFORMADOR	AÑO FABRICACIÓN:	2007	
MARCA:	MOBILGA	FABRICANTE:	PROMELBA	
EN SERVICIO:	SI	CANTIDAD DE ACEITE:	638 KG	
TIPO DE ACEITE:	MINERAL	COMERCIALIZADO:	EN CARGA	
TARDE DE EMBAJÓN:	SE TIENE	SILICA GEL:	SE TIENE	
FORMA DE EXTRACCIÓN MUESTRA:	BT000017			
OTROS:	Análisis físico Químico del aceite aislante. Muestra extraída por el cliente.			
PRUEBAS	NORMA	UNIDADES	RESULTADOS	LÍMITES
<b>PRUEBAS ELÉCTRICAS:</b>				
RESISTIVIDAD DIeléCTRICA	ASTM D1816	KV/2.8 mm	27	≥ 40
<b>PRUEBAS FÍSICAS:</b>				
DENSIDAD	ASTM D153	g/ml	0.837	< 0.90
TENSION INTERFACIAL	ASTM D971	dyn/cm	23	≥ 25
TURBID	ASTM D1500		< 1.6	≤ 3.0
APARTE VIDA	ASTM D1324		B y C	Bleah y Clor
<b>PRUEBAS QUÍMICAS:</b>				
CANTIDAD DE AGUA	ASTM D1533	ppm	18	≤ 30
ACIDEZ	ASTM D974	mg KOH/g aceite	0.03	< 0.10
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:</b>				
<p>1. Los resultados obtenidos de las pruebas de densidad, color aparente, cantidad de agua y acidez se encuentran dentro de los valores recomendados.</p> <p>2. La conductividad se encuentra por debajo de los valores recomendados. Continuar monitoreando la conductividad de forma periódica para detectar cualquier cambio.</p> <p>3. El resultado de la prueba de vida se encuentra dentro de los valores recomendados.</p> <p>4. De acuerdo con los resultados obtenidos, se recomienda efectuar el Cambio o Regeneración con Tierra Fulleriana Sistema Tamponado al aceite del equipo y posterior a eso un nuevo análisis físico Químico para verificar el estado del aceite.</p>				
 Laboratorio Promelba S.A.C. Lina Raquel Claro Cano Ingeniera Química				

## Anexo 4: Protocolo de análisis físico químico de aceites dieléctricos

– después de regenerar con tierra fuller nueva

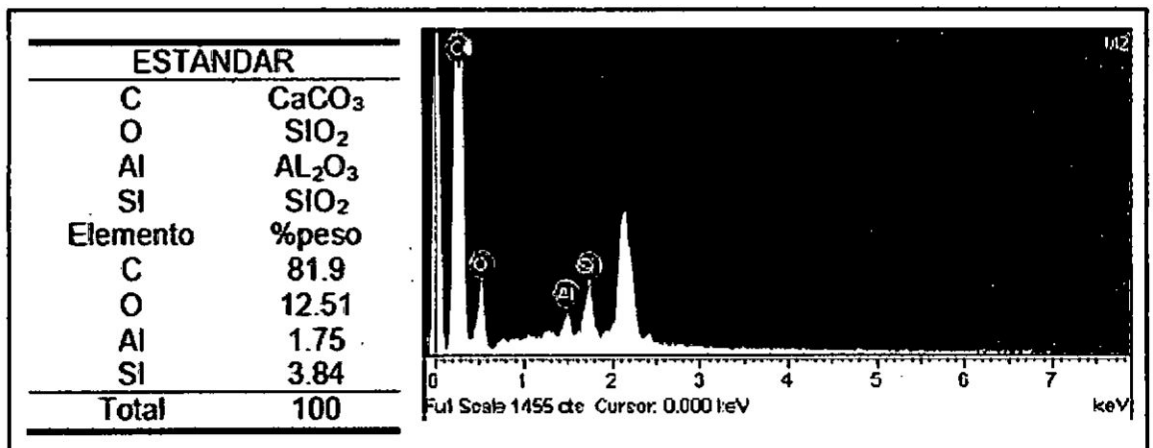
PROTOCOLO DE ANÁLISIS ACEITES AISLANTES Nº: 2017 - 002				
DATOS DEL EQUIPO				
CLIENTE:	O&C INGENIERÍA Y SERVICIOS GENERALES S.A.C		FECHA EMISIÓN PROTOCOLO:	08/10/2017
LIBRARIO:	SERPHE		TENSION:	10 / 0.40 - 0.23 KV
INDUSTRIACION:	NO INDICA		POTENCIA:	630 KVA
CLASE DE EQUIPO:	TRANSFORMADOR		AÑO FABRICACIÓN:	2013
TIPO SEM:	T 2072		FABRICANTE:	AVJ & ASOCIADOS
EN SERVICIO:	NO		CANTIDAD DE ACEITE:	370 Kg
TIPO DE ACEITE:	GENERAL		COMBUSTADOR?	NO INDICA
TABLA DE EXTENSIÓN:	SI TIENE		SACA OIL?	NO INDICA
FECHA EXTRACCIÓN MUESTRA:	03/01/2017			
OTROS:	Análisis Físico Químico del aceite aislante, muestra enviada por el cliente.			
PRUEBAS	NORMA	UNIDADES	RESULTADOS	LÍMITES
<b>PRUEBAS QUÍMICAS:</b>				
OPACIDAD	ASTM D1816	1/100 mm	44	> 40
<b>PRUEBAS FÍSICAS:</b>				
DENSIDAD	ASTM D153	g/cm <sup>3</sup>	0.866	< 0.90
TEMPERATURA DE PUNTO DE CONGELACIÓN	ASTM D971	temperatura	23	< 23
COLESTEROL	ASTM D2500	-	1.0	< 1.0
AFIRMACIÓN	ASTM D6204	-	B Y C	Además de 2014
<b>PRUEBAS QUÍMICAS:</b>				
CANTIDAD DE AGUA	ASTM D953	ppm	3	< 10
ACIDEZ	ASTM D974	mg KOH/g aceite	0.01	< 0.1
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:</b>				
<p>Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas efectuadas, se encuentran dentro de los valores recomendados, indicando que el aceite presenta buenas características para el trabajo del transformador.</p> <p>De acuerdo con los resultados obtenidos y a fin de llevar un buen seguimiento del estado del aceite aislante se recomienda efectuar un nuevo análisis Físico Químico dentro de doce meses (Enero 2018).</p>				
				

**Anexo 5: Fotografía microscópica para la tierra fuller contaminada**



FUENTE: Agudelo (2010)

**Anexo 6: Espectrograma para la tierra fuller contaminada**



FUENTE: Agudelo (2010)

**Anexo 7: Propiedades típicas de la tierra fuller utilizada en la regeneración del aceite dieléctrico**

PROPIEDADES TÍPICAS	Malla 8/16	Malla 16/30	Malla 30/60
Densidad (lb/ft <sup>3</sup> )	30	31	33.9
Humedad (%)	1	1	1
Perdida por ignición a 1000 °C % peso	4.6	4.6	4.6
pH	6.7	6.7	6.7
Análisis de tamiz(% en peso)			
Mas que 8 (malla)	2	0	0
8/16	96	2.2	0
16/30	1.8	95.5	3.3
30/30	0.2	1.9	96.4
Menos que 60	<0.1	0.2	0.3

FUENTE: Oil Dri co, (1999)