



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

TEMA:

Análisis comparativo entre el aceite mineral y aceite vegetal
utilizado como fluido dieléctrico y refrigerante en transformadores de
distribución.

AUTOR:

Rojas Díaz, Becquer Steven

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de

INGENIERO ELÉCTRICO -MECÁNICA

TUTOR:

M. Sc. Hidalgo Aguilar, Jaime Rafael

Guayaquil, 9 de marzo del 2022



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO – MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el **Sr. Rojas Díaz, Becquer Steven** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO ELÉCTRICO-MECÁNICA**.

TUTOR

M. Sc. Hidalgo Aguilar, Jaime Rafael

DIRECTOR DE CARRERA

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, 9 de marzo del 2022



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO – MECÁNICA

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Rojas Díaz, Becquer Steven**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación: **Análisis comparativo entre el aceite mineral y aceite vegetal utilizado como fluido dieléctrico y refrigerante en transformadores de distribución**, previo a la obtención del Título de **Ingeniero Eléctrico-Mecánica**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 9 días del mes de marzo del año 2022

EL AUTOR

Rojas Díaz, Becquer Steven



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO – MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Rojas Díaz, Becquer Steven**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Análisis comparativo entre el aceite mineral y aceite vegetal utilizado como fluido dieléctrico y refrigerante en transformadores de distribución**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 9 días del mes de marzo del año 2022

EL AUTOR

Rojas Díaz, Becquer Steven

REPORTE URKUND

URKUND Orlando Philco Asqui (orlando.philco)

Documento	Lista de fuentes	Bloques
Steven Rojas final Tesis - 10-02-2022 Tesis final- corección urkund.docx (D128172982)	73%	Análisis Comparativo entre el Aceite Mineral y el Aceite Vegetal Utilizados C...
Presentado	75%	Análisis Comparativo entre el Aceite Mineral y el Aceite Vegetal Utilizados C...
Presentado por	94%	Quitiaquez, W., Simbaña, A., Simbaña, I., Isaza, C., Nieto, C., Quitiaquez, P., ...
Recibido		1540561464_49_Preguntas_Practica_1_JoseGarcia5.docx
Mensaje		Corrección Steven Rojas Mostrar el mensaje completo

FACULTAD EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELÉCTRICA-MECÁNICA CON MENCIÓN EN GESTIÓN EMPRESARIAL INDUSTRIAL

TEMA:

Análisis Comparativo entre el Aceite Mineral y Aceite Vegetal Utilizado como Fluido Dielectrico y Refrigerante en Transformadores de Distribución.

AUTOR:

BÉCQUER STEVEN ROJAS DÍAZ

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de INGENIERO EN ELÉCTRICO - MECÁNICA

TUTOR: Ing. Jaime Rafael Hidalgo Aguilar

DEDICATORIA

Se lo dedico a mis padres, abuelos y personas especiales que ya no se encuentran conmigo, en especial a Dios que sin el nada de esto sería posible.

Rojas Díaz, Bécquer Steven

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por las noches que ha escuchado mis oraciones, a mis compañeros de la facultad, a mis padres que siempre fueron parte de este proceso, a los docentes que impartieron y compartieron su sabiduría a lo largo de esta formación profesional y como ciudad de bien, destacando la importancia de los valores y la ética.

Agradezco la Universidad Católica Santiago de Guayaquil por recibirme con brazos abiertos y hacerme sentir parte de su respetable institución académica y permitirme representarla.

Agradezco a mis abuelos, que nunca perdieron la fe de que este momento llegaría, a mi tutor el Ing. Rafel Hidalgo, que integro una base importante de los conocimientos que fui adquiriendo a lo largo de este proceso, a mi hermana la Arq. Emily Rojas que me acompañó en esta aventura de superación en una ciudad que no es nuestra, mostrando siempre su confianza y determinación, fe y buenas vibras para que este proceso terminase siendo un hecho consumado.

Bécquer Steven Rojas Díaz



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

M. Sc. Romero Paz, Manuel De Jesus

DECANO

f. 

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

DIRECTOR DE CARRERA

f. 

M. Sc. Vallejo Samaniego, Luis Vicente

OPONENTE

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
RESUMEN	XV
ABSTRACT.....	XVI
Capítulo 1: Generalidades de la Investigación	2
1.1 Introducción.....	2
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Objetivo General	3
1.5 Objetivos Específicos	4
1.6 Hipótesis de la investigación	4
1.7 Metodología de la Investigación	4
2 Capítulo 2: Generalidades Científico-Técnicas.....	5
2.1. Transformador de Distribución.....	5
2.2. Reseña Histórica	5
2.3. Partes del Transformador	6
2.3.1. Devanado	6
2.3.2. Devanado primario.....	7
2.3.3. Devanado secundario	7
2.3.4. Núcleo	7
2.4. Tubos de Enfriamiento.....	8
2.5. Tanque del Transformador.....	8
2.6. Cambiador de Tomas.....	9
2.7. Subcomponentes de los transformadores.....	10
2.8. Materiales Aislantes.....	10
2.9. Tipos de Aislamientos.....	10
2.9.1. Aislantes líquidos.....	10
2.9.2. Aislantes sólidos.....	11
2.10. Aspectos del Funcionamiento.....	11

2.11. Aceites del Transformador.	12
2.11.1. Características Térmicas.....	12
2.11.2. Propiedades eléctricas.....	12
2.11.3. Aceite dieléctrico de origen mineral.....	12
2.11.4. Aceite dieléctrico de origen vegetal	13
2.11.5. Composición química.....	14
2.11.6. Composición física.	15
2.12. Normas Referenciales en los Aceites para detección de Fallas al Interior del Transformador.	15
2.12.1. Seguridad ambiental.	15
2.12.2. Oxidación	16
2.12.3. Viscosidad.....	16
2.12.4. Miscibilidad.....	17
2.13. ASTM (American Society for Testing and Materials).	17
2.14. Norma ISO 2719 (Determinación del Punto de Inflamación).	17
2.15. Procesos de Degradación Térmica.....	18
2.16. Propiedades Térmicas de Transferencia.	19
2.16.1. Conductividad térmica.	19
2.16.2. Calor específico.	19
2.16.3. Densidad.....	20
2.17. Propiedades Dieléctricas	20
2.17.1. Resistividad Volumétrica.	20
2.17.2. Constante Dieléctrica.....	20
2.18. Detección de Fallas en los Transformadores por Análisis en los Aceites Dieléctricos.....	22
3 Capítulo 3: Metodología Experimental y Diseño.....	23
3.1. Examinación de Parámetros Eléctricos.....	23
3.1.1. Pruebas de medición de resistencia eléctrica.	23
3.1.2. Pruebas de relación de polaridad/fase	23
3.1.3. Pruebas de relación de transformación.....	23

3.1.4. Pruebas del vacío.	24
3.1.5. Pruebas significativas de aumento de temperatura.	24
3.1.6. Pruebas de impulso.	25
3.1.7. Pruebas del potencial inducido.	25
3.2. Pruebas de Exploración de los Aceites.	26
3.2.1. Número de neutralización (Método de la normativa ASTM D 974, D 664, D 1534).	26
3.2.2. Tensión interfacial (Método de la normativa ASTM D 971 O D 2285).	26
3.2.3. Tensión de ruptura dieléctrica (Método de la normativa ASTM D 877).	26
3.3. Funcionamiento de Transformadores a Base de Ésteres Naturales en Comparación del Aceite Mineral.	27
3.4. Descripción del Proceso Análisis en los Aceites.	28
3.5. Prueba Visual ASTM D 1524	30
3.6. Rigidez Dieléctrica	30
3.7. Electrodos en Forma de Hongo	33
3.8. Procesos de Cálculo Experimental.	34
3.9. Factor de Disipación o Potencia.	35
3.10. Punto de Fluidez.	35
3.11. Tendencia de Gases.	35
3.12. Regeneración del Aceite Mediante el Sistema de Arcillas.	37
3.12.1. Tierra fuller.	37
3.13. Método de Regeneración Tradicional.	38
3.14. Método de Percolación por Gravedad.	38
3.14.1. Método de percolación por presión.	39
3.14.2. Método de Contacto.	40
3.15. Sistemas de Regeneración Modernos.	40
3.16. Sólidos Aislantes en los Transformadores y Empaques.	41
3.17. Papel aislante Kraft.	41
3.17.1. Composición del papel aislante tipo Kraft.	41

3.18. Envejecimiento del Papel Kraft.....	42
3.18.1. Envejecimiento del papel mediante hidrolisis.....	42
3.18.2. Envejecimiento mediante Oxidación.....	43
3.18.3. Envejecimiento mediante pirólisis.....	44
3.18.4. Prueba de resistencia química.....	45
3.19. Empaques.....	45
3.20. Designación de Empaques.....	46
3.21. Empaque Sumergidos en Aceite Vegetal.....	46
4 Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones.....	47
5.....	47
4.1. Conclusiones.....	47
4.2. Recomendaciones.....	47
Referencias Bibliográficas.....	49
Glosario.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2.

Tabla 2. 1. Resistividad Volumétrica	20
Tabla 2. 2. Valores de constante dieléctrica en función de la composición ..	22

Capítulo 3.

Tabla 3. 1: Rangos de la Norma ASTM D 1816	34
Tabla 3. 2: Comparativa de las propiedades físicas y eléctricas de los diferentes líquidos	36
Tabla 3. 3: Características de arcilla granular	38
Tabla 3. 4: Factor de envejecimiento según el contenido de agua	43
Tabla 3. 5: Resistencia de la tracción ante la presencia de ácidos	43
Tabla 3. 6: Expectativa de vida del transformador	44
Tabla 3. 7: Propiedades mecánicas de los empaques no envejecidos	45
Tabla 3. 8: Cambio de las propiedades mecánicas en el empaque envejecido térmicamente	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2.

Figura 2. 1 Devanados en el transformador.	6
Figura 2. 2. Armado interno de transformador de distribución tipo poste.	9
Figura 2. 3. Flujo a través del núcleo.	11
Figura 2. 4. Degradación de los Aceites Industriales.	18
Figura 2. 5. .Montaje experimental para medir constante dieléctrica.	22

Capítulo 3.

Figura 3. 1. Medición de Resistencia eléctrica en Transformadores.	23
Figura 3. 2. Pruebas de Relación de Transformación	24
Figura 3. 3. .Pruebas de Vacío en el Transformador.	24
Figura 3. 4. Pruebas de Aumento de Temperatura.	25
Figura 3. 5. Pruebas de Potencial Inducido.	25
Figura 3. 6. Tensión de Ruptura de los Líquidos Aislantes.	27
Figura 3. 7. .Prueba de envejecimiento a 170°C del papel de celulosa.	27
Figura 3. 8. Diagrama de flujo proceso de regeneración.	30
Figura 3. 9. Colores y examen visual bajo la normativa ASTM D1524.	30
Figura 3. 10. Diagrama esquemático del equipo.	31
Figura 3. 11. Los electros planos distanciados 2.5mm según la Norma ASTM D-87.	32
Figura 3. 12. Electrodo tipo hongo.	34
Figura 3. 13. Metodología de percolación por gravedad.	39
Figura 3. 14. Diagrama de sistema de regeneración moderno.	40
Figura 3. 15. Forma estructural de la celulosa.	42

RESUMEN

El presente trabajo de titulación está enfocado a analizar y comparar características de los aceites dieléctricos vegetales y los aceites minerales que se utilizan como refrigerantes de transformadores en el sector eléctrico, con el fin de examinar sus componentes y determinar la incidencia que tiene cada uno en el ambiente, en la vida útil del transformador y el nivel de peligro que representan. Para tal efecto, se llevó a cabo una investigación cuantitativa deductiva para identificar eficiencia y confiabilidad del aceite como refrigerante en transformadores de potencia. También se aplica el método descriptivo, con el fin de detallar principios y las propiedades de los aceites vegetales cuentan con mayor rigidez dieléctrica, tienen mayores beneficios económicos, menor peligro de generar incendios y son más beneficiosos para lograr el óptimo funcionamiento de los transformadores de distribución eléctrica. La aportación de este trabajo es determinar la capacidad dieléctrica refrigerante de los aceites vegetales con la capacidad de los aceites minerales derivados del petróleo, en transformadores de potencia eléctrica.

Palabras claves: Aceite vegetal, Minerales, Transformador, Dieléctricos, Refrigerantes.

ABSTRACT

The present degree work is focused on analyzing and comparing characteristics of vegetable dielectric oils and mineral oils that are used as transformer coolants in the electrical sector, in order to examine their components and determine the incidence that each one has in the environment, in the useful life of the transformer and the level of danger they represent. For this purpose, a deductive quantitative research was carried out to identify the efficiency and reliability of the oil as a coolant in power transformers. The descriptive method is also applied, in order to detail principles and properties of vegetable oils have higher dielectric strength, have greater economic benefits, less danger of generating fires and are more beneficial to achieve optimal operation of distribution transformers. electrical. The contribution of this work is to determine the dielectric cooling capacity of vegetable oils with the capacity of mineral oils derived from petroleum, in electrical power transformers.

Keywords: Vegetable oil, Minerals, Transformer, Dielectrics, Refrigerant.

Capítulo 1: Generalidades de la Investigación

1.1 Introducción

Un transformador es un equipo eléctrico y estático que permite que ciertas funciones de la corriente varíen, como la fuerza o el voltaje, y que mantengan la frecuencia en condiciones ideales. Los transformadores están ubicados en subestaciones de generación, transformación y distribución de energía, y se caracterizan por utilizar aceite como medio aislante y refrigerante, sobre todo el aceite mineral, que es un aislante dieléctrico derivado del petróleo, no biodegradable y cuyas materias primas no son renovables, por lo que su uso genera consecuencias ambientales negativas.

En ese sentido, para efectos del presente estudio se busca demostrar los beneficios de los aceites dieléctricos de base vegetal o ésteres naturales, lógicamente, debido a que son amigables con el ambiente. Su aparición no es reciente, en realidad, se comercializan desde la década de los noventa, y las materias primas que se utilizan para elaborar estos fluidos son de diversas fuentes, por ejemplo, de girasol, de palma, de soja, etc. Por lo tanto, al ser Ecuador un país agrícola, se busca promover el uso de ésteres naturales con el fin de erradicar la dependencia de derivados de petróleo, incentivar mayor responsabilidad ambiental e incluso generar nuevas plazas de trabajo.

1.2 Planteamiento del problema

La función del transformador de distribución es reducir el voltaje medio de la red a un voltaje sumamente bajo (secundario) para el uso residencial o industrial, de tal manera que el usuario cuente con un servicio seguro, continuo, eficaz y estable. Debido a la naturaleza de sus funciones, los transformadores suelen trabajar con ciertos niveles de sobrecarga durante periodos mínimos o largos, pero cuando sobrepasan los niveles establecidos en la normas ASTM, suelen generar problemas que perduran en el tiempo, por ejemplo, los componentes dieléctricos que circulan a través del transformador y su núcleo pierden sus propiedades aislantes, hecho que provoca el deterioro del aislamiento de los terminales, pérdidas excesivas en

el cobre, pérdidas inmoderadas al interior del núcleo, bobinas quemadas, desmoronamiento general y pérdidas considerables para el sistema de distribución.

Expuesto todo esto, surge una inquietud. ¿Son los aceites de origen vegetal, idóneos para el óptimo funcionamiento de los transformadores de distribución a largo plazo?

1.3 Justificación

Dentro de la industria de fabricación de equipos eléctricos, en especial en la de transformadores, se utiliza en gran medida aceite mineral como material dieléctrico aislante y refrigerante, cuyos componentes atentan a la integridad física de la persona que opera el equipo y son inmensamente agresivos con el ecosistema. Ante esta situación, se evidencia la necesidad de ejecutar un análisis técnico para determinar el cambio de estos componentes por otros que sean respetuosos con el ambiente y brinden garantías de seguridad para el operador.

Ante esta realidad, la presente investigación se enfoca en demostrar que el uso de aceites vegetales como materiales dieléctricos y refrigerantes es lo más conveniente para el ecosistema, además, aporta a mejorar las características funcionales en los transformadores eléctricos de distribución e incide positivamente en el ámbito económico debido a que la compra y mantenimiento de estos equipos se realice con menor frecuencia. Para tal efecto, se desarrolla el sustento legal y normativo correspondiente con el fin de demostrar que el camino a seguir en la industria debe estar enfocado al uso de aceites vegetales.

1.4 Objetivo General

Comparar la capacidad dieléctrica refrigerante de los aceites vegetales con la capacidad de los aceites minerales derivados del petróleo, en transformadores de distribución.

1.5 Objetivos Específicos

- Recopilar información de las características físicas y químicas de los aceites dieléctricos de origen vegetal que son utilizados como aislantes eléctricos.
- Valorar el comportamiento de los componentes en los aceites vegetales en transformadores de distribución.
- Efectuar un análisis del comportamiento de los transformadores de distribución mediante pruebas técnicas de rutina.
- Sugerir mejoras para el rendimiento de los transformadores de distribución a partir de pruebas eléctricas comparativas, mediante el uso de aceites vegetales como alternativa de aceites minerales.

1.6 Hipótesis de la investigación

El uso de los aceites dieléctricos de origen vegetal influye en la vida útil del transformador de distribución.

1.7 Metodología de la Investigación

Actualmente, gracias a los cambios climáticos y los fenómenos que se presentan en la naturaleza en este siglo XXI, las naciones alrededor del mundo se han visto obligados a implementar cambios en busca de las mejoras en el ámbito cultural, industrial, comercial y de administración. En lo que le compete al sector eléctrico que es el área en el cual se desarrolla este proyecto de investigación, la presencia significativa de equipos que atentan con la naturaleza, siendo uno de estos los transformadores de distribución.

El presente estudio se lleva a cabo con una investigación cuantitativa deductiva y de tipo descriptiva, con el fin de realizar pruebas eléctricas de los aceites vegetales que se utilizan como recursos dieléctricos y refrigerantes en transformadores de distribución eléctrica. Con el fin de demostrar el impacto que tienen en el ambiente en vista que se utilizan dentro de la red de distribución convencional del Ecuador.

Capítulo 2: Generalidades Científico-Técnicas

2.1. Transformador de Distribución

Un transformador de distribución se denomina al elemento más importante de una red de distribución eléctrica, estos transformadores tienen potencias similares o inferiores a los 500 kVA y de unas tensiones semejantes o inferiores a los 34.500kV. Como lo menciona (Peña & Prentice, 2010), la mayoría de estas unidades están montadas en postes, y algunas de las unidades de mayor potencia por encima de 18 kV se utilizan para la instalación de estaciones o plataformas, además las aplicaciones típicas son granjas, residencias, edificios y otros depósitos públicos, talleres y centros comerciales.

Los transformadores convierten el voltaje de entrada en otro de salida, y su trabajo lo realizan dentro del proceso en el que se genera la energía eléctrica como tal, al transmitirla y al distribuirla. Se los utiliza en diversos campos, desde lo doméstico hasta las telecomunicaciones, y el rol que cumplen es de gran trascendencia no solo en términos de seguridad, sino por los daños económicos que pueden surgir ante la falla de un equipo (Sanz, 2017).

2.2. Reseña Histórica

A mediados del siglo XIX los científicos Nikola Tesla y Thomas Alva Edison, defensores de la corriente alterna y la corriente continua, se vieron envueltos en una guerra conocida como la "Batalla de las Corrientes" porque ambos buscaban la mejor manera de transmitir la electricidad, energía a largas distancias. En ese entonces se pudo concluir que el ganador de esa guerra fue Nikola Tesla, ya que la corriente alterna se usa en todos los campos. La razón para usar corriente alterna es que es fácil subir y bajar el voltaje para minimizar la pérdida de energía durante el transporte. (Caballero & Pizarro, 2017)

El transformador eléctrico merece crédito como uno de los inventos más importantes de la era industrial, en conjunto con la energía de vapor, la

iluminación a gas, la corriente y el aprovechamiento de la electricidad como tal. De hecho, el uso eléctrico no sería posible sin el transformador, cuyo nombre hace honor a sus funciones debido a que transforma (o convertir) el voltaje alto a uno más bajo.

Según ENDESA (2021) esta máquina eléctrica estática o fija opera según el principio de la inducción electromagnética, el ajuste de los valores de tensión y corriente, la frecuencia, mientras que el mantenimiento. Vea como el último punto de la cadena del suministro de energía, enviando electricidad directamente a los establecimientos residenciales, comerciales e industriales. Una vez generada la electricidad en el generador de las centrales, y antes de enviarla a la red, se utilizan los transformadores elevadores para elevar la tensión y reducir así las pérdidas en el transporte producidas por el efecto Joule. Una vez transportada se utilizan los transformadores reductores para darle a esta electricidad unos valores con los que podamos trabajar.

A continuación, se describe las partes de un transformador de distribución eléctrica.

2.3. Partes del Transformador

2.3.1. Devanado

Se denomina devanado a las vueltas de alambre conductor que componen una bobina, como se muestra en la 2.1

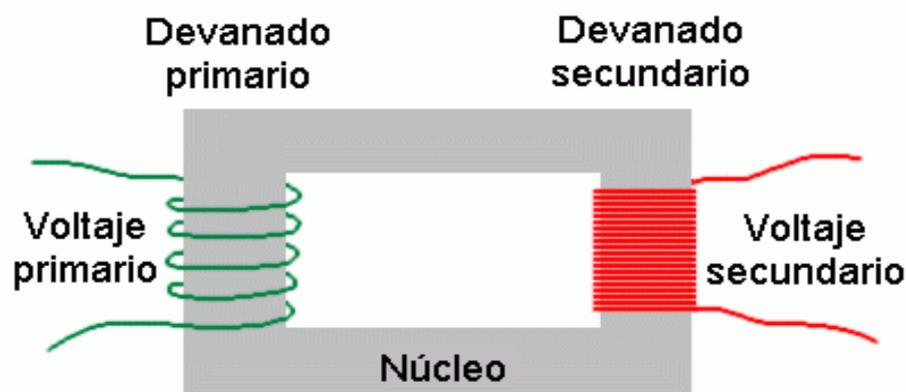


Figura 2. 1 Devanados en el transformador.
Fuente: (De Máquinas y Herramientas, 2013).

2.3.2. Devanado primario

El devanado o bobina primaria, se encuentra conectado a la fuente de energía, se encarga de recibir la fuerza electromotriz (f.e.m) de la corriente alterna que se requiere para aumentar o disminuir desde la línea de suministro. El devanado es un hilo de cobre enrollado a través del núcleo en uno de sus extremos y recubierto por una capa aislante, que suele ser barniz.

2.3.3. Devanado secundario

El devanado o bobina secundarios suministra energía a la carga y, en consecuencia, se genera la fuerza electromotriz por el cambio de magnetismo y debido al núcleo que lo rodea. El nombre de primario y secundario es algo simbólico: por definición allá donde se aplica la tensión de entrada será el primario y donde se obtenga la tensión de salida será el secundario.

2.3.4. Núcleo

El núcleo de los transformadores está formado por chapas de acero al silicio aisladas entre ellas. Están compuestos por dos partes principales: las columnas, que es la parte donde se montan los devanados, y las culatas, que es la parte donde se realiza la unión entre las columnas. El núcleo se utiliza para conducir el flujo magnético, ya que es un gran conducto (ENDESA, 2021).

Es la zona por la cual circula el campo magnético de los devanados primarios y secundarios y, dependiendo de la finalidad, puede ser de varias formas y estar constituido de diversos materiales. Como lo menciona Benavides (2004): El núcleo tiene como función conducir el flujo magnético generado por los devanados y confinándolo dentro de una trayectoria cerrada y formando el circuito magnético. El material empleado para los núcleos se conoce como acero al silicio de grano orientado que posee una alta permeabilidad. El silicio le permite conducir con mayor facilidad el flujo y la orientación del grano hace que el flujo circule con mayor intensidad y en una sola dirección, reduciendo la dispersión que produce pérdidas de energía. Las líneas de flujo producen a su alrededor pequeñas cantidades de corriente que son indeseables, ya que constituyen pérdidas de energía (Eddy). Para reducir

estas corrientes, el núcleo se construye con láminas muy delgadas de 0.007" a 0.014" aisladas por ambos lados con una capa muy fina de recubrimiento dieléctrico. (p. 14)

Es necesario tomar en cuenta que se debe manejar cuidadosamente las laminaciones que forman el núcleo debido a que son bastante sensibles a los esfuerzos mecánicos, por lo que sus características físicas pueden verse afectadas y generar un aumento de pérdida energética. Estos esfuerzos se producen durante la manipulación y corte de las laminaciones, y también por el enrollado del núcleo. En el caso de los transformadores de menor tamaño, el esfuerzo se reduce al someter al núcleo a un proceso de recocido que se lo hace en hornos a temperaturas elevadas, con el fin de que se reestablezcan las propiedades que fueron modificadas (Benavides, 2004).

2.4. Tubos de Enfriamiento.

Como su nombre lo indica, los tubos de refrigeración se utilizan para enfriar el aceite del transformador que circula de forma natural o forzada. Se considera que es natural cuando el aceite se calienta y sube debido al aumento de la temperatura, y así mismo baja cuando se enfría. En cambio, es forzada cuando se emplea una bomba (Huerta, 2020).

2.5. Tanque del Transformador.

La cuba o tanque es la envolvente del transformador, suele estar fabricada en chapa de acero en forma cilíndrica, rectangular, ovalada, entre otras. Sirve como conjunto de bobina central y como un recurso refrigerante, brinda protección mecánica y seguridad ante agentes contaminantes y también una superficie de disipación mientras se desplazan los agentes en su interior. (Peña & Prentice, 2010). La preservación del tanque se la realiza con ciertos recubrimientos con el fin de protegerlo contra la corrosión, no obstante, previamente se debe hacer una adecuada limpieza con recursos abrasivos y productos químicos (fosfatizado). Además, es importante considerar que las condiciones de la pintura y el color per se inciden en la disipación del calor, por lo que es necesario tomar las medidas correspondientes para evitar el deterioro (Benavides, 2004),

El tanque tiene complementos para maniobras de izaje, deslizamiento, transporte, llenado y drenado del líquido aislante, y su diseño le permite tolerar un alto vacío y presiones máximas de hasta 15 libras por pulgada cuadrada (Benavides, 2004), como se puede ver en la figura 2.2.

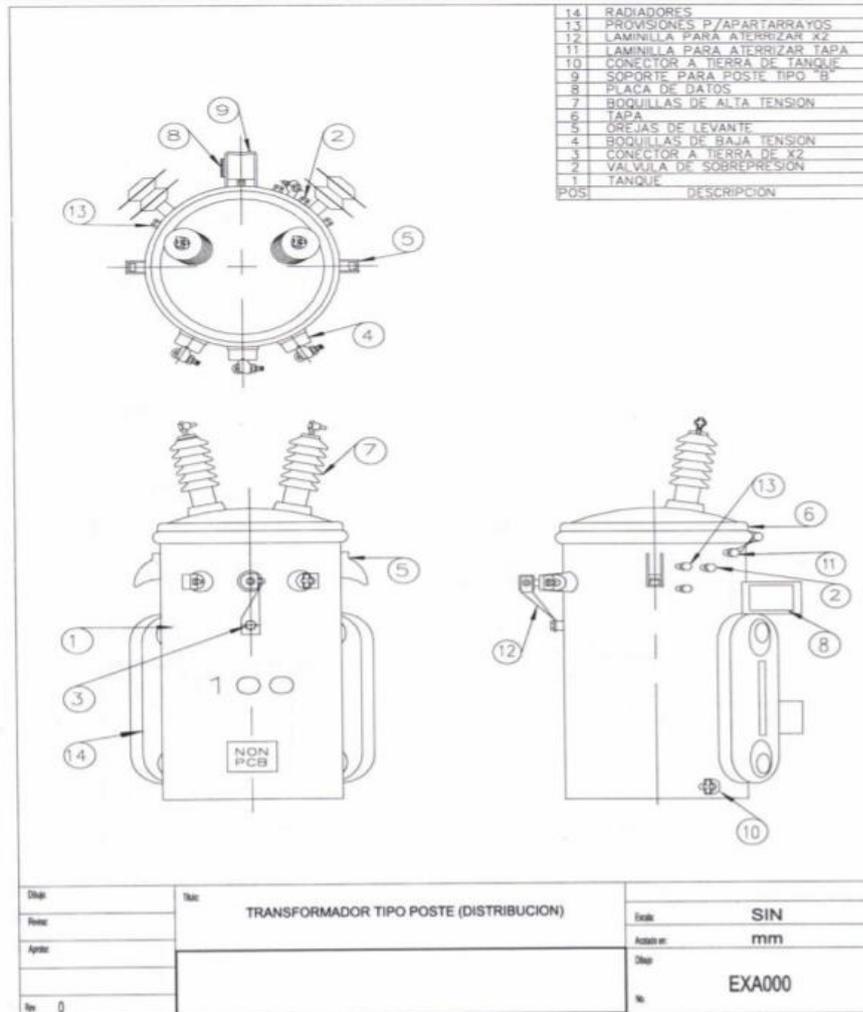


Figura 2. 2. Armado interno de transformador de distribución tipo poste.
Fuente: (Benavides, 2004)

2.6. Cambiador de Tomas.

Para equilibrar las variaciones de tensión dentro del transformador se utilizan cambiadores de tomas que pueden ser de dos tipos, con carga y sin carga. En los primeros, las tomas se cambian sin aislar el transformador del suministro; cuando son sin carga, el transformador tiene que desconectarse del suministro.

2.7. Subcomponentes de los transformadores.

Los subcomponentes de un transformador son:

- Cobre
- Aluminio
- Hierro
- Madera
- Papel Kraft
- Cartón
- Aceite mineral
- Porcelana
- Cintas
- Resinas
- Pinturas
- Empaques
- Polímeros
- Recubrimientos

2.8. Materiales Aislantes.

Los materiales aislantes utilizados en el transformador compuestos principalmente del aislamiento sólido que pueden ser (papel o cartón) y el aislamiento líquido (particularmente el aceite), este en especial es aquel que interactúa con la mayor parte de los componentes que integran el transformador (Caballero & Pizarro, 2017).

2.9. Tipos de Aislamientos.

2.9.1. Aislantes líquidos.

Los aislantes líquidos son aceites o fluidos que cumplen con características específicas como ser refrigerantes, ser aislantes eléctricos, proteger el papel, eliminar arcos, tener resistencia mecánica y ser disolventes de agentes contaminantes (Caballero & Pizarro, 2017).

2.9.2. Aislantes sólidos.

Se los considera a todos los componentes sólidos que se encuentran en el interior del transformador y que deben soportar fatiga mecánica, funcionar como aislantes, proveer el espacio al interior de este y por último prolongar la vida útil del transformador. Es en pocas palabras todo lo contrario a los aislantes líquidos, debido a que se presenta en un diferente estado de la materia (Jimenez & Gómez, 2016).

2.10. Aspectos del Funcionamiento.

En base a las leyes de inducción electromagnética, en el instante que se aplica una tensión alterna al primario que se mueve al interior del transformador, una corriente alterna produce un flujo dentro del núcleo. Por otro lado, al conectar una carga al secundario del transformador se genera una corriente que desata una fuerza magnetomotriz que tiende a cambiar el flujo, sin embargo, es importante recordar que la tensión del transformador no varía a menos que se cambie la fuente, entonces, se produce una fuerza magnetomotriz igual y opuesta en el devanado primario y, en consecuencia, se crea una corriente en el primario (Santisteban, 2015). En ese sentido, ante la relación entre las tensiones y corrientes del primario y secundario se obtiene la relación de transformación, como se indica en la ecuación 1.

Ecuación 1. Ecuación de relación de transformación.

$$\frac{E1}{E2} = \frac{I2}{I1} = \frac{N1}{N2} = m$$

A continuación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se detalla el flujo a través del núcleo.

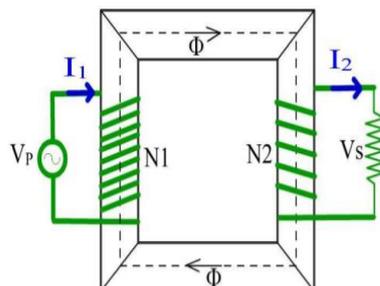


Figura 2. 3. Flujo a través del núcleo.

Fuente: (Santisteban, 2015)

Al analizar la potencia de los devanados, se visualiza que el valor producto de la tensión por la corriente es constante, lo que permite concluir que el transformador no consume potencia en condiciones ideales.

2.11. Aceites del Transformador.

Los aceites en los transformadores cumplen la función de ser aislantes y enfriar el sistema desde el núcleo hasta las bobinas o devanados, siempre y cuando se encuentren sumergidos completamente en el aceite, usualmente se utilizan aceites de minerales de hidrocarburos, pero también se presenta la alternativa de los aceites vegetales menos contaminantes.

2.11.1. Características Térmicas.

Entre las características térmicas que deben cumplir los aceites del transformador se encuentra la capacidad de ser conductor de calor, conductividad térmica y tener un adecuado rendimiento a bajas temperaturas entre otras.

2.11.2. Propiedades eléctricas.

El aceite del transformador debe principalmente ser buen aislante en vista que esa es su función central, por lo que los niveles de saturación tienen que mantenerse bajos con el objetivo de soportar campos divergentes, sobretensiones de conmutación y otros de tipo transitorios.

2.11.3. Aceite dieléctrico de origen mineral.

Los aceites dieléctricos de origen mineral son los que se utilizan comúnmente y contienen componentes nafténico y parafínicos, pero tienen problemas que los hace poco adecuados para su uso, por ejemplo, se estropean a medida que se utiliza el transformador y en consecuencia, existe mayor riesgo de incendio, además son poco amigables con el ambiente. Por lo tanto, el uso de aceite vegetal es la alternativa más segura y responsable con la naturaleza, y una de sus ventajas esenciales es que eleva las concentraciones iniciales del aceite de 160 grados a 360 grados.

La aplicación de este tipo de aceites está en crecimiento de manera paulatina, especialmente en los transformadores modernos que poco a poco se los utiliza. Como lo reflexiona Sanz (2017), los aceites minerales que se emplean hoy en día no difieren en gran medida de los que se utilizaban hace un siglo atrás, no obstante, si han mejorado la calidad en términos de la tecnología y técnicas de refinado, y en los avances que se han realizado de los transformadores.

En ese sentido, la única ventaja de los aceites dieléctricos derivados de hidrocarburos es que tienen un menor nivel de viscosidad, pero las desventajas son múltiples: no son biodegradables, tienen alta toxicidad, son más riesgos cuando se los manipula (por ejemplo durante la instalación), se tornan altamente inflamables a partir de los 160 grados centígrados, no tienen estabilidad ante altas temperaturas, no son compatibles con otros materiales, cuentan con bajo nivel de tolerancia a la humedad, su vida útil es menor en el transformador, sus propiedades térmicas son bajas y finalmente, son altamente riesgosos a causar incendios y explosiones.

2.11.4. Aceite dieléctrico de origen vegetal

Los aceites dieléctricos de origen vegetal son derivados de aceites de semillas. Según los productores, las especificaciones de estos aceites son confidenciales, pero en realidad tienen compuestos biodegradables y un pequeño porcentaje de aditivos con el fin de mejorar el rendimiento. De acuerdo con Sanz (2017): Los aceites vegetales están formados principalmente por triglicéridos (TGC) derivados de la reacción que se produce entre la molécula de glicerol con tres moléculas de ácidos grasos iguales o diferentes. Dependiendo del origen del aceite (palma, soja, colza, etc.), la longitud media de la cadena de los ácidos grasos (normalmente 12 a 24 carbonos) y el número de insaturaciones que muestran, pueden variar de forma significativa. (p. 36).

Las ventajas y desventajas de los aceites dieléctricos de ésteres naturales son las siguientes:

Ventajas:

- Biodegradables.
- Bajo riesgo por manipulación
- No son tóxicos
- Buena rigidez dieléctrica
- Estables a altas temperaturas
- Más tolerancia a la humedad
- Mayor tiempo de vida operacional en los transformadores
- Absorben los gases (no se liberan tantos gases ante un arco eléctrico)
- Excelentes características térmicas.
- Menor índice de explosiones e incendios.

Desventajas:

- Más viscosos.
- Tienden a gelificarse al contacto con el aire, por eso los tanques deben ser herméticos y sellados adecuadamente.

Además, de acuerdo con Suárez (2020): Los aceites vegetales tienen un excelente récord de seguridad y fuego a través de diez años, los aceites vegetales tienen un punto de ignición ASTM D-6871 NORMA ISO 2719 de 275°C a 300°C y un punto de fuego ASTM D-6871, NORMA ISO 2592 de 300°C a 330°C Versus 160-180°C del aceite mineral adjuntada la NORMA. (p. 11)

2.11.5. Composición química.

El aceite mineral es una mezcla de hidrocarburos producto de la destilación del petróleo y sus ésteres asociados. Por ejemplo, el aceite de silicona tiene polímeros inorgánicos y orgánicos, y los ésteres sintéticos son el resultado de la conjunción química de un alcohol y un ácido graso. En cambio, los aceites de origen vegetal son el fruto de un proceso de refinado de aceites de diferentes fuentes como de soja, colza, girasol, entre otros (Santisteban, 2015).

2.11.6. Composición física.

En la composición física de los aceites, los valores de viscosidad y gravedad específica no tienden a variar en el tiempo.

2.12. Normas Referenciales en los Aceites para detección de Fallas al Interior del Transformador.

A continuación, se detallan varias normas que se toman en cuenta para la detección de las fallas en el transformador:

- Norma ASTM D925 (2019). Práctica generalizada para el muestreo de líquidos aislantes eléctricos.
- Norma ASTM D3612 (2017). Práctica generalizada para el muestreo de líquidos aislantes, para el análisis de gases y detención de registros de humedad. Esto se hace bajo dos consideraciones: la muestra no puede absorber humedad y no debe contener partículas externas.
- Norma IEC 60475 (2011). Se lo usa para el muestreo de líquidos dieléctricos.
- Norma IEC 60567 (2011). Es una guía para la toma de muestra de gases y de aceites de equipos con este contenido en su interior, y el análisis de gases disueltos.
- Norma IEEE std c57.139 (2015). Es la guía para gases disueltos en transformadores.
- Norma IEEE stdc57.104 (2008). Guía para la interpretación de gases generados en transformadores inmersos en aceite.
- Norma IEEE std c57.106 (2015). Guía para aceptación y mantenimiento de aceite aislante mineral en equipos eléctricos.

2.12.1. Seguridad ambiental.

Los ésteres naturales y sintéticos se clasifican como biodegradables y no dañinos. Esto demuestra la gran diferencia que existe con los aceites minerales y de silicona, que son totalmente nocivos para el ambiente (Santisteban, 2015).

2.12.2. Oxidación

En cuanto a la oxidación, su presencia puede conducir a una gran modificación de las propiedades del aceite, por ejemplo, provocar corrosión dentro del depósito, aumentar la viscosidad, deterioro de la capacidad de refrigeración, entre otros, lo que altera de manera negativa el funcionamiento del transformador.

De acuerdo con el estudio de Cicuéndez (2012), el aceite fabricado de silicona es químicamente inerte y cuenta con una adecuada resistencia a la oxidación, hecho que resulta una ventaja ante temperaturas mayores a 175 grados centígrados, pues no se producen ácidos ni material viscoso. Por su parte, la oxidación de los ésteres sintéticos ocurre a partir de los 125 grados centígrados en adelante, y como consecuencia se generan ácidos naturales. En cuanto al aceite mineral, se oxida y volatiza a partir de los 105 grados centígrados y genera materiales intermedios, materia inorgánicos y se produce la separación del azufre que es el elemento que promueve la corrosión.

2.12.3. Viscosidad.

La viscosidad es una propiedad determinante de la capacidad que tenga el líquido para actuar como refrigerante. Un nivel bajo de viscosidad permite que los aislantes sólidos y el líquido dieléctrico se impregnen y se expulse el aire que está contenido, por lo tanto, mejora el comportamiento eléctrico y esto incide en la vida útil del aceite (Santisteban, 2015). Además, de acuerdo con el autor: Salvo en el caso del aceite de silicona de baja viscosidad, este parámetro es menor en el aceite mineral que en el resto de los fluidos alternativos considerados. La mayor viscosidad de los líquidos alternativos produce a priori, una disminución de la capacidad de refrigeración, cosa que produce un aumento de la temperatura de funcionamiento del transformador y dificulta, al mismo tiempo, la impregnación de los aislantes sólidos tanto en el proceso de fabricación como en su instalación y puesta en marcha. (Santisteban, 2015, p. 33).

2.12.4. Miscibilidad.

La miscibilidad de los líquidos es una característica esencial para poder sustituirlos. Así, el lavado del transformador es más adecuado si el aceite sustitutivo es miscible en el usado, por ejemplo, en condiciones ambientales regulares, el aceite de silicona es miscible con el aceite mineral.

2.13. ASTM (American Society for Testing and Materials).

La American Society for Testing and Material (ASTM,2007) es una organización estadounidense encargada de normalizar, desarrollar y publicar tratados con alcance internacional, con relación a normas técnicas para una gran variedad de sustancias, mercancías, sistemas y servicios. Al momento, existen más de 12 mil quinientos acuerdos de requisitos voluntarios de aplicación mundial.

2.13.1. Norma ISO 2719 (Determinación del Punto de Inflamación).

El punto de inflamación es un valor que se utiliza en políticas de transportación, almacenaje, manipulación y protección para establecer aquellos elementos inflamables y combustibles. De acuerdo con el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN, 2014):

Esta norma internacional describe dos procedimientos, A y B, para determinar, usando el aparato Pensky-Martens de vaso cerrado, el punto de inflamación de combustibles líquidos, líquidos con sólidos en suspensión, líquidos con tendencia a formar una película en su superficie en las condiciones de ensayo y otros líquidos. Es aplicable a líquidos con un punto de inflamación por encima de 40 °C. (p. 7).

El procedimiento A se aplica para definir el punto de inflamación de pinturas y barnices que no generen una lámina en la superficie, así como de aceites un utilizados y otros derivados de petróleo que no estén establecidos en el procedimiento B. En cambio, este último se lo utiliza para determinar el punto de inflamación de “fuelóleos residuales, betunes fluidificados, aceites lubricantes usados, líquidos con tendencia a formar una película en su

superficie, líquidos con sólidos en suspensión y materiales altamente viscosos como soluciones poliméricas y adhesivos” (INEN, 2014, p. 7).

Cabe mencionar que el concepto y magnitud de lo que se considera inflamable y combustible se establece, también, dentro de cada ley y normativa. Un determinado indicador que exponga al factor de inflamación requiere implicar la presencia de sustancias muy volátiles en sustancias excepcionalmente no volátiles o sea el caso no sean inflamables. Dado esto la prueba de punto de inflamación, puede ser el primer paso en las sustancias no inflamables y la prueba de del punto de inflamación da la pauta dentro de la investigación de la composición de materiales desconocidos.

2.14. Procesos de Degradación Térmica.

Los fluidos dieléctricos son esenciales para generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica. Las características de estas sustancias y de los elementos sólidos, son criterios que se toman en cuenta para diseñar el transformador con un coste adecuado, según el tiempo de vida y el impacto ambiental (Sanz, 2017). Es decir, el fabricante debe considerar las propiedades de los aceites minerales, vegetales, sintéticos, naturales, o la mezcla de ellos, con el fin de definir la estructura física del equipo. A continuación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra un ejemplo de la degradación de un aceite industrial.



Figura 2. 4. Degradación de los Aceites Industriales.
Fuente: (LUFILSUR, 2021)

2.15. Propiedades Térmicas de Transferencia.

La tarea principal de los aceites aislantes es disipar el calor en los equipos eléctricos. Al existir una transferencia térmica eficiente se disminuye la temperatura en los devanados, aumenta a la vida útil del transformador y se minimiza la degeneración de la celulosa (Sanz, 2017).

2.15.1. Conductividad térmica.

Se la considera como la capacidad que tiene el aceite para intercambiar energía en forma de calor, ante la ausencia de fenómenos de transporte de masas. En el caso de los aceites minerales, esto se establece con la norma ASTM-D2717 (2009), que define que se debe medir el gradiente de temperatura generado a través del aceite, mediante una cantidad de electricidad añadida en un vaso celular, que a su vez es calentada por una resistencia eléctrica de platino (Pt).

La mayor parte de los líquidos presentan valores de 0,3 a 0,045 W m⁻¹ K⁻¹. Una ecuación de utilidad para aceites minerales es la siguiente y que posiblemente pueda ser aplicable a algunos fluidos tipo éster. (Sanz, 2017. p. 41)

Entonces:

$$\lambda = 0.00028(1 - 0.0054 T)d^{-1}$$

En donde:

λ representa a la conductividad y depende de la temperatura (T) y la densidad (d).

2.15.2. Calor específico.

El calor específico, se define como la cantidad de calor (Q), suficiente para variar la temperatura de la masa denotado con la letra (m), de una sustancia siendo proporcional a la variación de temperatura (ΔT) y a la masa ya mencionada (Jiménez, 2018).

2.15.3. Densidad.

En los aceites aislantes, la densidad se usa para realizar el cálculo de la masa de un volumen de aceite, pero también se lo ve aplicado como un parámetro determinante, que sirve para calcular el flujo en el transformador de distribución (Sanz, 2017).

2.16. Propiedades Dieléctricas

2.16.1. Resistividad Volumétrica.

Cuando se aplica un potencial eléctrico a través de un aislador, la corriente está limitada por la resistencia u oposición que impone este material. Precisamente, el volumen se define como la resistencia encontrada cuando el Potencial eléctrico entre caras opuestas de un cubo. La unidad es Ohm.cm, resistividad del aceite a baja densidad de carga (< 500 V/mm), y depende de qué tan bien se disocian y forman iones. También, se encuentran los contaminantes como el agua, los ácidos y los sólidos polares que actúan como generadores de baja resistividad (Sanz, Herramienta de diagnóstico para evaluar el estado de los aceites dieléctricos biodegradables, 2017).

A continuación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se detalla la resistividad volumétrica.

Tabla 2. 1. Resistividad Volumétrica

	Resistividad Volumétrica
Aquil benceno	1x10E15
Polibuteno	8x10E14
Aceite de ricino	3x10E10
Dibutil Sebacato	5x10E12
Estearato Butílico	4x10E12

Fuente: (Sanz, Herramienta de diagnóstico para evaluar el estado de los aceites dieléctricos biodegradables, 2017)

2.16.2. Constante Dieléctrica.

La constante dieléctrica, también conocida como permitividad relativa del material. La constante dieléctrica o permitividad relativa de un medio continuo es una propiedad macroscópica de un medio dieléctrico relacionado con la

permitividad eléctrica del medio. La permitividad relativa, (ϵ) de una tela aislante, es la relación entre la capacitancia C de un condensador en el que el espacio entre los electrodos está ocupado por el uso de un material dieléctrico, y la capacitancia del condensador en el que la distancia entre los electrodos es de vacío C_0 . Esto se determina en la ecuación 2.

Ecuación 2. Fórmula para cálculo de la permitividad relativa.

$$\epsilon = \frac{C}{C_0}$$

En los programas dieléctricos, un buen dieléctrico además de una baja disipación de fuerza son las características deseadas. En un tejido dieléctrico perfecto (entre los que se encuentra el vacío) puede no haber pérdida de potencia debido a la ausencia de moléculas polarizadas, en los dieléctricos el dipolo segundo puede ser un componente de importancia extra o menor, dependiendo de su naturaleza. La constante dieléctrica es, entonces, una medida de la ineficacia de la tela como dieléctrico y, por lo tanto, cuanto menor es su coste, mayor es su rendimiento global como aislante (Sanz, Herramienta de diagnosis para evaluar el estado de los aceites dieléctricos biodegradables, 2017).

La exposición eléctrica produce tres variedades de polarización dentro del líquido: digital, atómica y de orientación. Sin embargo, un cuarto tipo tiene lugar en las interfaces entre materiales variados, como en el caso del papel-aceite, y que se denomina polarización interfásica. La constante dieléctrica o la permitividad relativa de los fluidos aislantes se decide mediante el uso de la polarizabilidad en sus moléculas, de su peso molecular y de la densidad. Es decir, la constante dieléctrica depende de la estructura electrónica y su diploma de polarización mientras se somete a un campo eléctrico.

Normalmente, la contribución de la polarización atómica es pequeña, y al sumar el valor con la polarización digital se obtiene la polarización de deformación, que se genera por la formación de dipolos dentro del campo eléctrico debido a la distribución desigual de los gastos electrónicos dentro de

las moléculas. Dado que es sensible a la temperatura, la constante dieléctrica de un tejido puede ser más sensible a los ajustes de temperatura en el caso de las moléculas que contienen grupos éster.

En el caso de los aceites minerales, la constante dieléctrica tiene valores dentro del rango de 2,1 a 2,3 dependiendo de su forma y peso molecular, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 2. 5. Montaje experimental para medir constante dieléctrica.
Fuente: (Cardona et al., 2014)

2.17. Detección de Fallas en los Transformadores por Análisis en los Aceites Dieléctricos.

A continuación, en la tabla 2.2 se detallan los valores de constante dieléctrica.

Tabla 2. 2. Valores de constante dieléctrica en función de la composición

Composición	A	B	C	D	E
%Ca [aromático]	21.5	15.0	0	12.0	11.0
%Cn [Nafténico]	36.5	40.0	45	38.5	36.0
%Cp [Parafínico]	42.0	45.0	55	49.5	53.0
Peso molecular (g/mol)	335	350	410	535	212
$\epsilon@27^{\circ}\text{C},100\text{Hz}$	2.28	2.20	2.09	2.22	2.14

Nota. Valores de constantes dieléctricas.

Fuente:(Sanz, 2017)

Capítulo 3: Metodología Experimental y Diseño

3.1. Examinación de Parámetros Eléctricos

3.1.1. Pruebas de medición de resistencia eléctrica.

Las comprobaciones eléctricas se ejecutan para verificar que los transformadores cumplen con las especificaciones de diseño, como se muestra en la 3.1. Además, brindan una serie inicial de evaluaciones de referencia para que una de ellas pueda utilizarse para funciones que se pueden examinar en futuras pruebas eléctricas sobre el terreno.



Figura 3. 1. Medición de Resistencia eléctrica en Transformadores.
Fuente. (Domínguez, 2019)

Usualmente, en los transformadores se realizan las pruebas de relación de polaridad /fase, de relación de transformación, de vacío, pruebas significativas de aumento de temperatura, pruebas de impulso y de potencial inducido. Todas ellas se especifican en los siguientes apartados:

3.1.2. Pruebas de relación de polaridad/fase

Se realiza para comprobar que los devanados están conectados, tal como se indica en la placa de características.

3.1.3. Pruebas de relación de transformación.

Se realiza para verificar la polaridad y la relación de transformación, de los devanados de un transformador eléctrico, para certificar la presencia de corto circuitos entre las espiras y los errores en las conexiones de boquillas, cambiadores de derivaciones (INTEC, 2004), como se visualiza en la **¡Error! o se encuentra el origen de la referencia.**3.2.



Figura 3. 2. Pruebas de Relación de Transformación
Fuente. (Meprem Eléctrica S.A , 2022)

3.1.4. Pruebas del vacío.

La prueba de vacío es realizada alimentando el bobinado secundario de un transformador, procurando mantener el bobinado del primario abierto. Para regular las tensiones de pruebas en el sistema de control, el cual deberá empezar desde cero voltios hasta llegar a la tensión nominal (Velasco, 2015). Como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el devanado secundario permanece abierto y, por lo tanto, no circula corriente.



Figura 3. 3. Pruebas de Vacío en el Transformador.
Fuente. (Meprem Eléctrica S.A, 2022)

3.1.5. Pruebas significativas de aumento de temperatura.

Esta prueba se realiza directamente en la fábrica, como se visualiza en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Está diseñada para si las elevaciones de temperatura de los devanados, el aceite y los diferentes componentes corresponden con los valores de la disposición.



Figura 3. 4. Pruebas de Aumento de Temperatura.
Fuente. (Meprem Eléctrica S.A, 2022)

3.1.6. Pruebas de impulso.

Las comprobaciones de impulsos están diseñadas para simular lo que el transformador puede experimentar comúnmente durante su ciclo de existencia. Así, una onda completa disminuida establece el patrón de onda, una onda cortante simula el desmoronamiento de la tensión o la liberación de una onda viajera a través del suelo de un aislante, una onda completa simula una descarga de rayo distante, y una frente de onda actúa como una descarga inmediata de rayo.

3.1.7. Pruebas del potencial inducido.

La prueba de la máquina de aislamiento de bucle a bucle y de bobina a bobina, con ondas de mayor frecuencia (120 a 400 Hz), se hace para evitar tensiones immoderadas de sección a segmento, como se visualiza en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 3. 5. Pruebas de Potencial Inducido.
Fuente. (Sector Electricidad, 2017)

3.2. Pruebas de Exploración de los Aceites.

En los siguientes apartados se detallan las comprobaciones del aceite, y proporcionan datos valiosos sobre su comportamiento.

3.2.1. Número de neutralización (Método de la normativa ASTM D 974, D 664, D 1534).

Es un grado de los componentes orgánicos ácidos dentro del aceite. En el aceite nuevo, la variedad de neutralización es pequeña y aumenta debido al envejecimiento, deterioro y la oxidación. A medida que el aceite se oxida, una cierta cantidad de las sustancias de descomposición se vuelven ácidas, lo que significa que pueden reaccionar y ser neutralizadas por medio de una sustancia alcalina. La cantidad de ácido se indica en miligramos hidróxido de potasio por gramo de muestra (mg KOH/g). (Caballero & Pizarro, 2017).

3.2.2. Tensión interfacial (Método de la normativa ASTM D 971 O D 2285).

Es la capacidad del aceite para encapsular las moléculas de agua y las sustancias polares, así, los materiales que no se mezclan forman una superficie o interfaz mientras entran en contacto. Una ansiedad interfacial excesiva es capaz de mantener un alto poder dieléctrico y se la mide en mili newtons consistentes con el metro (mN/m). Cuando el aceite se encuentra en el transformador, la TIF (certificación de tipo inspección federal) del aceite baja entre 5 mN/m y 10 mN/m. A partir de ahí, el valor disminuye progresivamente a medida que el aceite envejece y se oxida, entonces, los compuestos polares formados mediante la oxidación debilitan la interfaz y se reduce la tensión interfacial. Por lo tanto, una disminución lenta de la tif (certificación del tipo de inspección federal) es un signo de envejecimiento del aceite, o de que existe una mezcla de un aceite dieléctrico con cualquier otro lubricante comercial. (Caballero & Pizarro, 2017).

3.2.3. Tensión de ruptura dieléctrica (Método de la normativa ASTM D 877).

Como lo indica (Astudillo, 2008), en esta prueba se presentan algunos agentes contaminantes como son por ejemplo: Polvo, agua, partículas

conductoras), al valor de tensión dado en kilo voltios representa la descarga entre los electrodos la cual se conoce como rigidez dieléctrica sea en los aceites mineral, tanto como en los aceites vegetales, tal como se detalla en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 3. 6. Tensión de Ruptura de los Líquidos Aislantes.

Fuente. (Santisteban, 2015)

3.3. Funcionamiento de Transformadores a Base de Ésteres Naturales en Comparación del Aceite Mineral.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el papel que se utiliza para el aislamiento en las bobinas de los transformadores. Al no permanecer debidamente aislados se deterioran de manera significativa en períodos más largos, ante la presencia de aceites vegetales, a diferencia de lo que sucede con los aceites minerales convencionales.

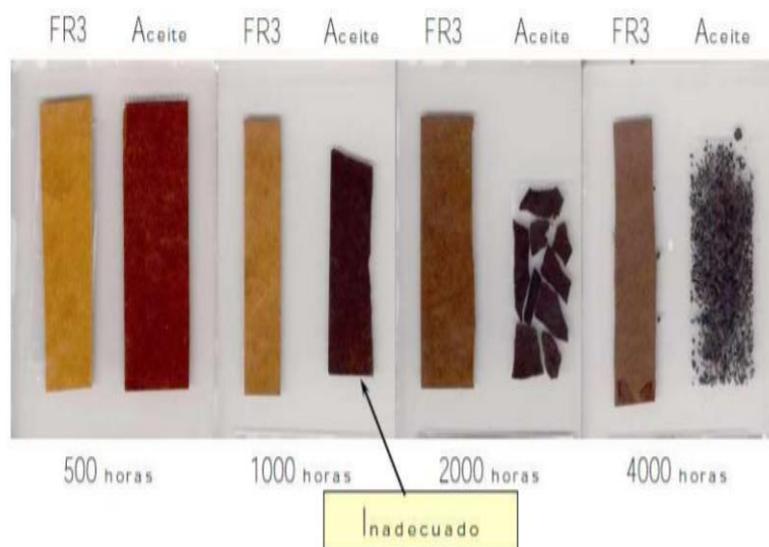


Figura 3. 7. Prueba de envejecimiento a 170°C del papel de celulosa.

Fuente: (Suárez, 2020)

3.4. Descripción del Proceso Análisis en los Aceites.

El aceite obtenido tiene que ser examinado para detectar el contenido de PCBs (bifenilos policlorado). Los aceites minerales aislantes eléctricos en varios transformadores contienen cantidades medibles de bifenilos policlorados. La manipulación, el mantenimiento y la eliminación de estos transformadores y aceites se simplificarían si los PCB en el aceite se redujeran a menos de 2 ppm ($\mu\text{g/g}$). Un proceso exitoso debería eliminar los PCB de manera eficiente y confiable. Además, el aceite procesado debe ser adecuado para uso continuado como fluido dieléctrico y no debe presentar un problema inusual para el medio ambiente.

Si se determina que está libre de bifenilos policlorados, se guarda en tanques para provocar la regeneración. En caso de que el aceite no pueda ser tratado porque corre el riesgo de contaminar el aparato y las sustancias utilizadas, el fluido se transporta desde el almacenamiento a un filtro magnético, cuya función es capturar los restos de acero que contiene el aceite. (Caballero & Pizarro, 2017).

A continuación, el aceite pasa por un filtro-prensa compuesto por varias mallas que atraen el carbón y los diferentes residuos presentes en el fluido. Acto seguido, el aceite se lleva a un depósito de transferencia desde donde se traslada a una torre en la que se mezcla con tierra de Fuller, con el fin de eliminar los ácidos contenidos en el aceite. El tiempo que transcurre entre el acceso y la salida de esta torre se conoce como tiempo de permanencia, y a la salida de la torre se coloca un desalajo como precaución. Posteriormente, el aceite se guarda de nuevo en tanques desde donde se envía al factor de termo vacío (elimina la humedad) (Caballero & Pizarro, 2017).

Finalmente, los gases que se generan como consecuencia de la técnica son trasladados a la bomba de vacío, en donde se termina el tratamiento (lavado) para disminuir la contaminación y se libera el vapor de agua al ambiente. Aunque este método se utiliza para tratar los aceites dieléctricos minerales, la regeneración de los aceites de origen vegetal puede realizarse

mediante técnicas de características similares. Se debe indicar que los PCB que se hayan escapado del equipo al concreto o suelo debajo deben limpiarse almacenado pendiente de eliminación. El equipo de protección personal y los materiales de limpieza pueden ser contaminados con PCB y requieren una eliminación adecuada.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** se presenta un diagrama con una metodología para el proceso de análisis de los aceites minerales.

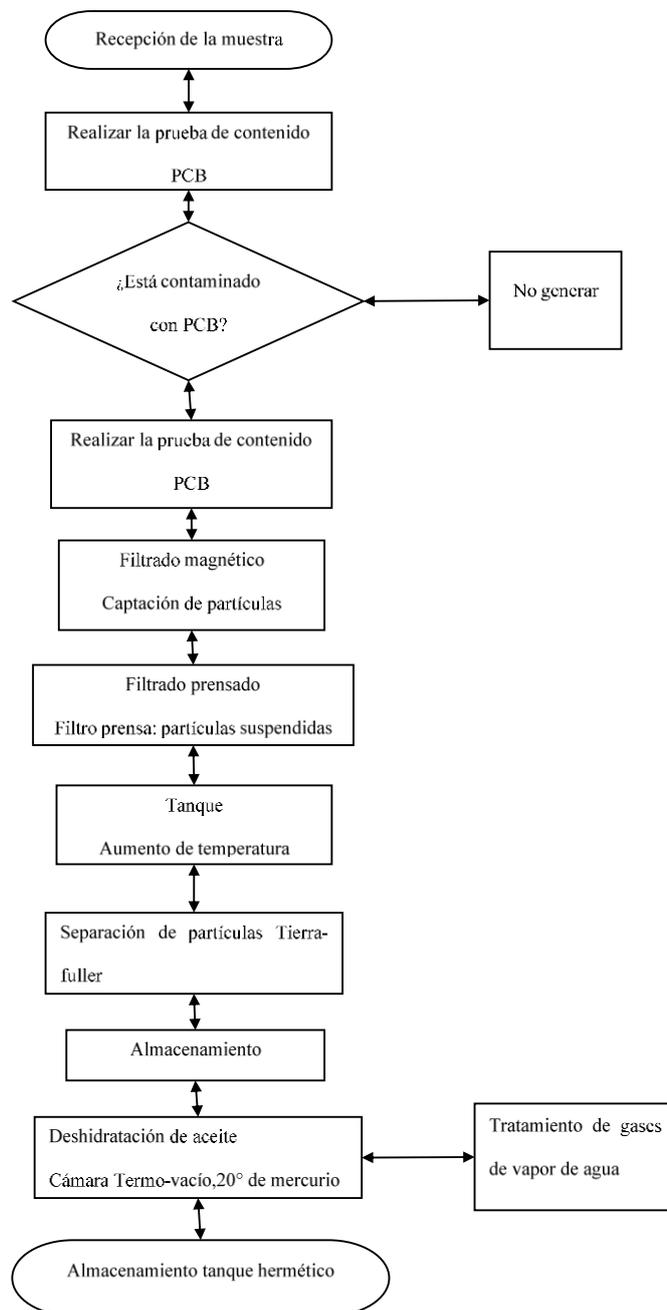


Figura 3. 8. Diagrama de flujo proceso de regeneración.

Fuente: El autor

3.5. Prueba Visual ASTM D 1524

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se describe el método de medición del color en la norma ASTM D1524, utilizado para combustibles que incluyen aceites lubricantes, para calefacción, combustibles diésel y ceras de petróleo. La escala de colores varía entre 0,5 y 8. El valor más bajo de 0,5 es amarillo claro, 2 es amarillo, 5 es naranja y 8 es rojo intenso.



Figura 3. 9. Colores y examen visual bajo la normativa ASTM D1524.

Fuente: (Quitiaquez et al., 2019)

3.6. Rigidez Dieléctrica

Es la máxima tensión que puede soportar un material sin llegar a que se perfora. A este tipo de tensión se la conoce como la tensión de ruptura del material. En este caso, los bastos aislantes no son los ideales debido a que pueden ser penetrados por una corriente presente, entonces, si la tensión sobre ellos es alta, actúan como conductores (esto ocurre en todas las sustancias excepto en el vacío, que es el aislante correcto). (Caballero & Pizarro, 2017)

Por lo general, la prueba para determinar la rigidez dieléctrica se realiza en aceite o en el aire, y supone colocar la sustancia entre dos electrodos con el fin de incrementar a la par el voltaje hasta que un incinerado eléctrico agujere la sustancia o se produzca una evidente descomposición. (Caballero & Pizarro, 2017)

Esta muestra debe ser por lo general de 0,8 a 3,2 mm, sin embargo, las muestras mayores de 2 mm de grosor suelen probarse en aceite para evitar que se desborden antes de romperse. Además, cuanto mejor sea la energía del equipo, mayor es la gama de espesores y materiales aislantes (gaseosos, líquidos o fuertes) a examinar. Cabe indicar que la rigidez dieléctrica se calcula dividiendo la tensión de ruptura por el espesor de la probeta.

A continuación, el esquema del diagrama del transformador se observa en la figura 3.10.

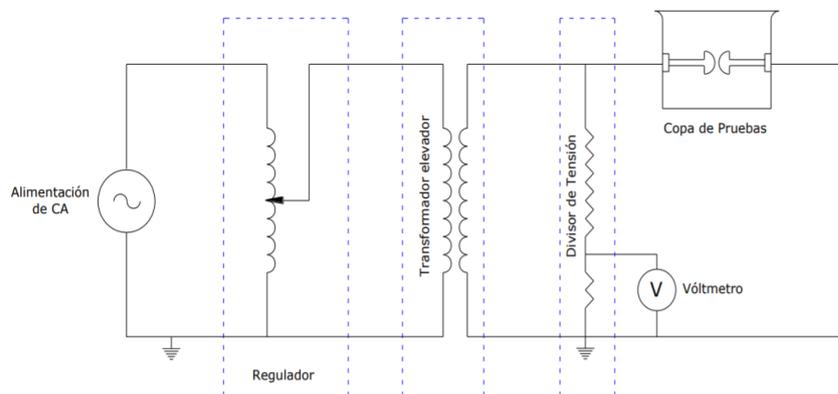


Figura 3. 10. Diagrama esquemático del equipo.

Fuente: (INTEC , 2004)

El regulador de tensión sirve para incrementar el voltaje de manera gradual y automática. Por su parte, el transformador se lo utiliza para obtener el voltaje de alta tensión que es necesario para provocar el arco eléctrico en el aceite. Su salida debe ser de 0 a 60 kV, y la velocidad con la que se tiene que incrementar el voltaje depende de la norma que se utilice. Todo este proceso es referenciado de las normas ASTM-D-877, para la cual aplica un incremento del voltaje de 3kV por segundo, y la norma ASTM-D-1816, en la que la velocidad de incremento de voltaje es de 0.5kV por segundo (INTEC, 2004).

El divisor de voltaje permite reducir el voltaje de alta tensión a valores manejables mediante un voltímetro de baja tensión, y así poder medir el voltaje en el que se produce el arco eléctrico. Por su lado, la copa de pruebas

se usa para contener el aceite a probar y tiene integrados un par de electrodos a los cuales se le aplica el voltaje de alta tensión. Entonces, el arco eléctrico se produce precisamente en el espacio que queda entre los electrodos (INTEC, 2004). Las características de la copa de pruebas dependen de la norma que se indique, como se observa en la figura 3.11.

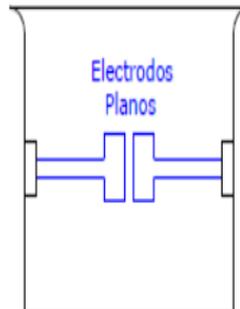


Figura 3. 11. Los electros planos distanciados 2.5mm según la Norma ASTM D-87.
Fuente: (INTEC, 2004)

A continuación, se detallan los pasos a seguir de una prueba de rigidez dieléctrica, según lo indica (INTEC, 2004).

- Lavar la copa y los electrodos con aceite aislante en buenas condiciones y evitar tocar con las manos el interior del recipiente. En lugares con alta humedad relativa, la copa debe calentarse ligeramente para evitar condensación.
- Seleccionar la norma con la que se va a realizar la prueba.
- Colocar el selector de la velocidad de incremento de voltaje en la posición que corresponda (0.5 o 3 kV/segundo).
- Colocar los electrodos de acuerdo con la norma seleccionada (planos o semiesféricos).
- Revisar que los electrodos seleccionados no tengan erosión causada por el efecto de arco eléctrico. En caso de encontrar defectos, los electrodos deben pulirse y colocarse nuevamente, calibrando la distancia entre ellos.

- Llenar la copa con el aceite que se va a probar hasta un nivel mayor de 20 mm sobre la parte superior de los electrodos. De esta manera, se evita que se produzca un arco en el aire.
- Dejar reposar el aceite por un lapso de entre 2 y 3 minutos.
- Aplicar el voltaje de prueba hasta que se produzca el arco eléctrico. Registrar en el formato de prueba el valor del voltaje en el que se genera el arco.
- Esperar 1 minuto y volver a realizar la prueba. Repetir este procedimiento hasta obtener cinco valores de rigidez dieléctrica.
- Promediar los 5 valores obtenidos y registrar este dato en el formato de prueba.
- Si el valor promedio de la rigidez dieléctrica es mayor a 30 kV, se considera que el aceite pasa la prueba, caso contrario, la muestra de aceite debe ser rechazada.

3.7. Electrodo en Forma de Hongo

La Norma ASTM D-1816 especifica pruebas con electrodos tipo hongo esparcidos entre sí en 2,032 mm. En la prueba se debe utilizar en aceites nuevos y usados cuando se requiere de una mayor precisión en los resultados (Quitiaquez et al., 2019), como se observa en la figura 3.12



Figura 3. 12. Electrodo tipo hongo.

Fuente: (Quitiaquez et al. 2019)

3.8. Procesos de Cálculo Experimental.

De acuerdo con la norma ASTM D1816 (2019), el proceso de cálculo experimental permite determinar la tensión por ruptura dieléctrica de los fluidos aislantes como aceites de origen de hidrocarburos, fluido a base de silicona, aceite aislante eléctrico de alto punto de ignición, fluidos de los ésteres sintéticos y los fluidos de los denominados ésteres vegetales o naturales (Caballero & Pizarro, 2017). Esto se detalla en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Rangos de la Norma ASTM D 1816

Norma	ASTM D 1816	
Electrodos	Forma Tamaño de separación	 2 o 1 mm
Agitación de la muestra del aceite	Impulsor Bola magnética	Sí Sin opción
Temperatura de prueba en laboratorio	Líquido Ambiente	Se debe registrar la temperatura 20°C-30°C
Temperatura de prueba exterior	Líquido Ambiente	Se debe registrar la temperatura Pruebas de arbitraje 20°C-30°C
Voltaje de prueba	Velocidad de subida Frecuencia	0,5 kV·s-1 45 –65 Hz
Rupturas	Definición Cantidad de secuencia Tiempo entre rupturas	< 100 V 5 1 a 1,5min
Voltaje de prueba, tiempo de apagado.	Normal Aceite siliconado	No especificado No especificado

Nota. Rangos de la Norma ASTM D 1816.

Fuente: (Caballero & Pizarro, 2017).

3.9. Factor de Disipación o Potencia.

Este factor es la medida de las pérdidas dieléctricas de los fluidos aislantes en un campo eléctrico alterno y de la energía liberada como calor. Como lo indica Caballero y Pizarro (2017).

Los valores límites del factor de potencia para los diferentes líquidos aislantes se expresa en porcentaje y está determinado por el estándar ASTM D924 (ASTM, 2008b). Este método de prueba también nos ayuda a determinar si existe contaminación, alta humedad u oxidación en el líquido aislante, en el caso que se encuentre algunos de estos agentes el valor del factor de potencia es elevado (p. 37)

3.10. Punto de Fluidez.

El factor de fluidez es la temperatura más baja en la que el aceite del transformador actúa sin dificultad, por esta razón, es importante poner en funcionamiento al transformador en temperaturas inferiores a 0°C, de tal manera que se pueda evidenciar si el líquido dieléctrico funciona adecuadamente.

3.11. Tendencia de Gases.

En algunos casos, cuando un aceite se somete a un nivel de alto voltaje se desea establecer la velocidad de evolución o absorción de gases, en base a características establecidas en ciertas pruebas. La correlación de los resultados de prueba de la ASTM 2300 con el rendimiento del equipo son limitadas, independientemente del tipo de fluido. Los esteres naturales tienen más baja tendencia de gases que los aceites minerales, el rango típico o de los esteres naturales se encuentra entre los -50 $\mu\text{L}/\text{min}$ a -90 $\mu\text{L}/\text{min}$ (Caballero y Pizarro, 2017, p. 37).

A continuación, en la tabla 3.2 se detallan las propiedades físicas y eléctricas de los diferentes líquidos.

Tabla 3. 2: Comparativa de las propiedades físicas y eléctricas de los diferentes líquidos

	Aceite mineral	Aceite de silicona	Ester sintético	Aceite vegetal	Método de prueba
Tensión de ruptura, Kv	30-85	35-60	45-70	82-97	IEC 60156
Permitividad relativa a 25°C	2.1 – 2.5	2.6 – 2.9	3.0 – 3.5	3.1 – 3.3	IEC 60247
Viscosidad a 0°C, mm ² s ⁻¹	<76	81 – 92	26 – 50	143 - 77	
A 40°C	3 – 16	35 – 40	14 – 29	16 – 37	ISO 3104
A 100°C	2 – 2.5	15 – 17	4 – 6	4 – 8	
Punto de fluidez	30 a -60	-50 a -60	-40 a -50	-19 a -33	ISO 3016
Punto de flameo °C	100 – 170	300 – 310	250 – 270	315 – 328	ISO 2592
Punto de fuego °C	110 – 185	340 – 350	300 – 310	350 – 360	
Densidad a 20°C, kg dm ³	0.83 – 0.89	0.96 – 1.10	0.90 – 1.00	0.87 – 0.92	ISO 3675
Calor específico, J g ⁻¹ K ⁻¹	1.6 – 2.0	1.5	1.8 – 2.3	1.5 – 2.1	ASTM E1269
Conductividad térmica, W m ⁻¹ K ⁻¹	0.11 – 0.16	0.15	0.15	0.16 – 0.17	(DCS)
Coefficiente de expansión, 10 ⁻⁴ K ⁻¹	7 – 9	10	6.5 – 10	5.5 – 5.9	ASTM D1903

Nota. Comparación de las diferentes propiedades químicas, físicas y eléctricas de los diferentes aceites dieléctricos.

Fuente: Adaptado de (Caballero & Pizarro, 2017) .

3.12. Regeneración del Aceite Mediante el Sistema de Arcillas.

El aceite dieléctrico es fundamental para el adecuado rendimiento del transformador de distribución y potencia sumergido. No obstante, los residuos que surgen de la parte activa del dispositivo, el nivel de la temperatura y varios factores externos inciden en que se disminuya el funcionamiento del aceite que, si bien puede reemplazarse, la acción que esto implica genera un elevado costo y un impacto ambiental negativo, por lo que es recomendable aplicar procesos para recuperarlo de manera significativa y que además son mucho más económicos. (Argueta, Contreras, & Guardado, 2017)

El aceite puede regenerarse a través del tacto y percolación, que son los procesos tradicionales, aunque en las últimas tres décadas se han desarrollado equipos automatizados y computarizados que son capaces de regenerar con el transformador energizado. En estos procesos, la tierra Fuller (Earth Fuller's) se utiliza comúnmente debido a sus rasgos de blanqueo y adsorción (Caballero & Pizarro, 2017).

3.12.1. Tierra fuller.

Como lo menciona Agudelo (2015): La tierra Fuller es un adsorbente utilizado en los procesos de regeneración de aceite dieléctrico libre de PCBs, debido a la capacidad para adsorber contaminantes producidos por la degradación del aceite dieléctrico, como resultado de este proceso, la Tierra Fuller resulta contaminada con trazas de aceite dieléctrico, lodos y ácidos, las cuales al estar contaminadas son consideradas como un residuo peligroso (p. 10)

En Estados Unidos, este término se adopta a mediados del siglo XX, dentro de los procesos en los que están relacionados los hidrocarburos. Además, a lo largo de los años han existido numerosas estrategias en estos procesos, principalmente en la filtración y la absorción. Sin embargo, hoy en día se utiliza para designar las arcillas y al uso del tratante de los aceites dieléctricos (Caballero & Pizarro, 2017).

Dentro del material que hoy en día se conoce como tierra fuller predominan los minerales palygorskite y calcio-esmectita. La primera es una arcilla que absorbe compuestos polares, con apariencia grisácea y con tintes azules, y una estructura cristalina, además, el tamaño de los granos difiere según la aplicación que vayan a tener (Hosterman y Patterson, 1992., Murray, 1999), como se puede observar en la tabla 3.3.

Tabla 3. 3: Características de arcilla granular

Propiedades	8/16 MESH	16/30 MESH	30/60 MESH
Densidad lb/ft ³	31	31	32
Humedad libre	1.0	1.0	1.0
Clasificación volátil	Baja	Baja	Baja
	Volatilidad	Volatilidad	Volatilidad
Perdida de ignición %	4.6	4.6	4.6
PH	6.7	6.7	6.7
Dureza	76.0	71.7	78.2

Nota. Presenta las propiedades de la arcilla granular.

Fuente: Adaptado de (Caballero & Pizarro, 2017)

3.13. Método de Regeneración Tradicional.

El tipo de arcilla depende del equipo que se utilice en la regeneración. Así, por ejemplo, la arcilla granular es la más indicada para el proceso de percolación, mientras que para el método por contacto es recomendable aplicar arcillas en polvo. La porción de tierra fuller necesaria para regenerar un galón de aceite depende del deterioro en el que se encuentra, el método de regeneración y el tipo de arcilla a utilizar.

3.14. Método de Percolación por Gravedad.

En este proceso, el aceite fluye verticalmente a través de un recipiente que contiene arcillas adsorbentes, usualmente tierra fuller. El aceite sin tratamiento se almacena en tanques, y a un nivel inferior se encuentra el tanque en el que se deposita el material adsorbente. Además, tiene un fondo

filtrante y una válvula flotadora que se encarga de controlar la salida del fluido del primer tanque. En cuanto se refiere a la salida final del aceite, la primera parte del fluido es de mejor calidad, por lo que al terminar el proceso se debe mezclar y, de esta manera, se logra un aceite de apariencia uniforme y con características similares (IEEE, 2008).

En el interior de este recipiente se encuentran los siguientes elementos:

Tanque de almacenamiento para el aceite antes de regenerar.

- Válvula
- Válvula flotadora.
- Lecho del material absorbente- (arcilla).
- Malla filtrante.
- Soporte.
- Orificio para inspección.
- Válvula.

Tanque de almacenamiento (producto final) con un agitador.

A continuación, en la Figura 3.13 se muestra la metodología de percolación por gravedad.



Figura 3. 13. Metodología de percolación por gravedad.

Fuente: (EcuRed, 2020)

3.14.1. Método de percolación por presión.

La dinámica en este método es similar a la anterior, no obstante, para forzar el movimiento del fluido se utiliza una bomba que agiliza el proceso y que permite tratar grandes cantidades de aceite en menor tiempo. La unidad que cumple la función de filtro tiene un diseño especial: cuenta con cartuchos

o bolsas en donde se encuentra la arcilla, y están ubicados de tal manera que son rodeadas por el fluido que circula a través de la arcilla antes de su salida; de esta manera, se garantiza que el aceite se filtre totalmente. En caso de que la máquina no se pueda trasladar hasta el punto donde se recupera el aceite, el sistema de regeneración sí se lo puede llevar (IEEE, 2008).

3.14.2. Método de Contacto.

En este caso, el aceite se deposita en un recipiente en donde es mezclado con la arcilla en polvo, y al mismo tiempo se inyecta calor hasta alcanzar la temperatura necesaria. Posteriormente, el aceite es enviado a un tanque desde donde se bombea a través de un filtro, cuya función es adecuar la arcilla. La porción de material y el estado del aceite a regenerar son factores determinantes en el producto final. Los residuos de aceite que quedan en la arcilla son retirados con aire comprimido colocado en el filtro. Los rangos de temperatura manejados en este proceso son altos (IEEE, 2008).

3.15. Sistemas de Regeneración Modernos.

Este sistema como menciona (Globecore , 2015) , fue lanzado al mercado por una compañía sur africana bajo el nombre de tecnología Fluidex. Un beneficio del sistema es su capacidad de reactivar la arcilla con la opción de reutilizarla hasta 300 veces, hecho que genera una contundente ventaja económica e impacta positivamente en el ambiente, dado que el material residual necesita un tratamiento distinto para su desecho (Horning et al., 2004). A continuación, en la figura 3.14 se muestra un modelo del sistema.

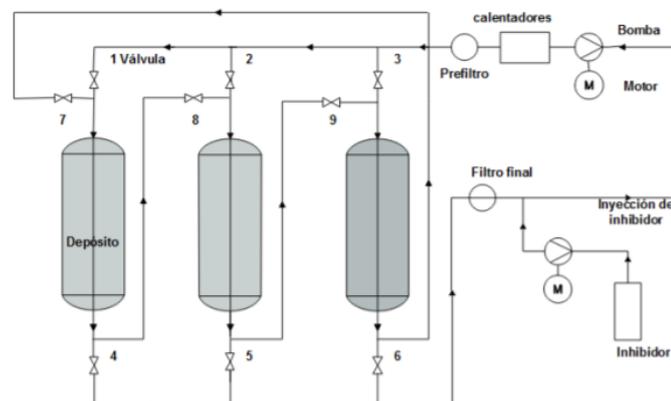


Figura 3. 14. Diagrama de sistema de regeneración moderno.
Fuente: (Caballero y Pizarro, 2017)

3.16. Sólidos Aislantes en los Transformadores y Empaques.

Como se mencionó anteriormente, el transformador eléctrico es uno de los activos esenciales del dispositivo eléctrico, por lo que debe funcionar óptimamente. Para que esto ocurra se debe tomar en cuenta el aislamiento líquido, que es de gran importancia para el transformador, no obstante, el aislamiento estable también juega un papel fundamental debido a que es responsable de aislar los devanados de alta y baja tensión, así como de soportar las tensiones térmicas y mecánicas que pueden surgir en el transporte ordinario, o mientras se produce un fallo.

3.17. Papel aislante Kraft.

Los papeles aislantes, por lo general se encuentran adheridos a los aceites u otros fluidos aislantes. La principal función del papel Kraft es la de cubrir los conductores que pueden ser tanto de cobre como de aluminio con la finalidad de ser aislante eléctricos y a su vez se ve expuesto a tensiones de tipo eléctricas, mecánicas y térmicas.

3.17.1. Composición del papel aislante tipo Kraft.

Para producir papel aislante se necesita la celulosa de la madera. Inicialmente, la composición química de la celulosa es de 50% a 56% de celulosa alpha, entre el 15% y el 25% de hemicelulosa y entre 27% y 29% de lignina. Cuando es sometida al proceso kraft, o al sulfato, tienden a eliminarse en gran parte la hemicelulosa y la lignina y se da como resultado la composición típica del papel kraft: 78% a 80% de celulosa, 10% a 20% de hemicelulosa y 2% a 6% de lignina (Caballero & Pizarro, 2017), véase la figura 3.15.

Como lo indica (Caballero & Pizarro, 2017), el grado de polimerización es el número promedio de anillos glucosídicos en una macromolécula de celulosa. Sus valores normales se encuentran en el rango de 1200 a 1400 para una pulpa kraft nueva no blanqueada. Sin embargo, hay otros factores que afectan el grado de polimerización de la celulosa nueva, como la fuente de la pulpa (el tipo de madera), las condiciones climáticas de los árboles, el tratamiento químico de la madera y la fabricación del papel y el cartón.

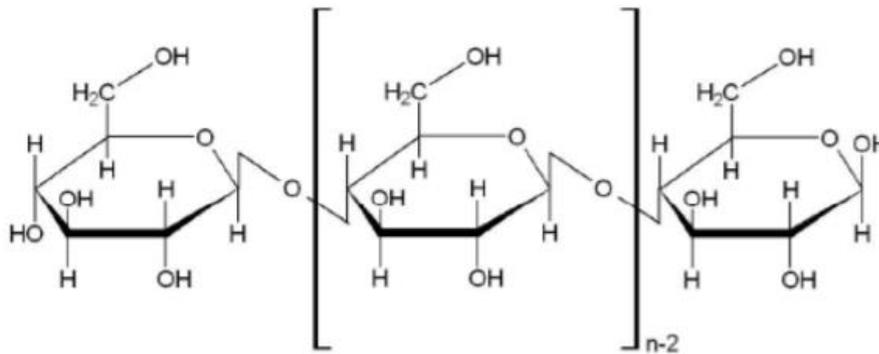


Figura 3. 15. Forma estructural de la celulosa.

Fuente: (Caballero y Pizarro, 2017)

El grado de polimerización es una medida importante para saber la resistencia mecánica (papel nuevo) y el envejecimiento del papel (papel ya usado). La norma utilizada para su determinación es la norma ASTM D4243 (1999), no obstante, estas pruebas arrojan valores estimados en vista que otros factores como el secado, las impurezas, el proceso de fabricación y el grado de refinación afectan dicho valor.

3.18. Envejecimiento del Papel Kraft.

El papel de envejecimiento del polimerización del papel kraft se decide por medio de la cantidad de anillos glicosídicos, es decir, cuanto más pendientes glicosídicos se encuentren en la composición química de la celulosa, mayor es el diploma de polimerización. En ese sentido, el envejecimiento del papel se lo considera como un procedimiento de despolimerización.

3.18.1. Envejecimiento del papel mediante hidrolisis.

Según menciona (Margalló, 2012, pp.17-29; Villa, 2015, pp.2-25), el envejecimiento por hidrolisis, además de dar cadenas más cortas, produce moléculas de agua, hecho que aumenta el contenido de humedad en el transformador a medida que transcurre el tiempo.

En la tabla 3.4 se muestra el factor de envejecimiento según el contenido de agua.

Tabla 3. 4: Factor de envejecimiento según el contenido de agua.

Porcentaje de agua por peso seco del papel aislante	Factor de envejecimiento
0,3%	1.0
2,0%	6 a 10
4,0%	12 a 45

Nota. Se presenta el envejecimiento del papel según el porcentaje de agua.

Fuente: Adaptado de (Gallo, 2005).

La hidrólisis, además de producir agua genera CO, CO₂, ácidos y unos compuestos llamados furanos. Los gases como el CO y CO₂ también son producidos por el aceite, pero en menor proporción. Por su parte, los furanos son compuestos únicos del papel aislante, por tal razón, su análisis es un buen método para determinar el envejecimiento de un transformador, especialmente el 2 Fal, que es uno de los compuestos orgánico heterocíclico más usados (Margalló,2012, pp.17-29; Villa, 2015, pp.2-25).

A continuación, en la tabla 3.5 se indica la resistencia de la tracción ante la presencia de ácidos.

Tabla 3. 5: Resistencia de la tracción ante la presencia de ácidos

Número de Neutralización (mg KOH/g)	Resistencia la tracción (psi)
0,01	17 x 10 ³
0,10	11 x 10 ³
0,20	9 x 10 ³
0,30	8 x 10 ³
0,40	7 x 10 ³

Nota. Se presenta la resistencia a la tracción del papel ante la presencia de ácidos.

Fuente: Adaptado de (Gallo,2005, pp.12-19).

3.18.2. Envejecimiento mediante Oxidación

La segunda causa principal de envejecimiento del papel es el oxígeno, debido a que es una forma de pirolisis o combustión lenta, dado que sus componentes finales son el agua y el dióxido de carbono, dado que de los

materiales que componen a un transformador, los aislamientos tienen un mayor envejecimiento (Crespo, García, Cabrera, & A, 2020).

3.18.3. Envejecimiento mediante pirólisis

El envejecimiento por pirólisis se presenta a temperaturas mayores a 140 grados centígrados, debido a que se produce H₂O, 2- Furfural, CO y CO₂. En condiciones normales de operación. Este proceso de envejecimiento es irrelevante, pues la temperatura normal de un transformador se encuentra entre los 110 grados centígrados. Es importante destacar que la temperatura es un factor muy importante en el envejecimiento del papel aislante, tal es el caso que la temperatura de operación del transformador incide en estimar la vida útil del papel.

En la tabla 3.6 se muestra la expectativa de vida del transformador con respecto a la temperatura del punto más caliente. Con un valor de 110°C se puede notar que la expectativa de vida útil se encuentra entre los 7,5 años, sin embargo, si la temperatura de operación se encuentra en 100°C este tiempo se triplica.

Tabla 3. 6: Expectativa de vida del transformador

Temperatura en el punto más caliente °C	Expectativa vida útil		%de vida ganada (Perdida)
	Días	Años	
180	4		(99,9)
160	25		(99,1)
140	250		(90,8)
120		3	(58,6)
110		7.5	100
100		22	293
85		102	1360
75		152	2027

Nota. Se presenta la expectativa de vida útil del transformador según el aumento de temperatura.

Fuente: Adaptado de (Gallo, 2005).

3.18.4. Prueba de resistencia química

Las propiedades mecánicas de los empaques mencionados no envejecidos se muestran en la tabla 3.7, y el cambio de las propiedades en la tabla 3.8.

Tabla 3. 7: Propiedades mecánicas de los empaques no envejecidos

Propiedades	Empaques de Nitrilo	Empaque de fluoro silicona
Dureza shore A	68	72
Estrés a máxima Carga	9.4 MPA	8.2 MPA
Elongación	243%	281%

Nota. Las propiedades Mecánica de los empaques no envejecidos.

Fuente: Adaptado de Wilhelm et al. (2015)

Tabla 3. 8: Cambio de las propiedades mecánicas en el empaque envejecido térmicamente.

Propiedades	Empaque de Nitrilo	Empaque de fluorosilicona
Dureza shore A	+10	-7
Estrés a máxima carga	3.9 MPA	7.9MPA
Elongación	55%	263%
Grietas	Ausente	Ausente

Nota. Compatibilidad de los materiales de construcción de los transformadores con los fluidos aislantes a base de ésteres naturales.

Fuente Adaptado de Wilhelm et al. (2015)

3.19. Empaques

Los transformadores de distribución que están sumergidos en aceite ,son equipos usados normalmente en la intemperie , en pocas palabras son más propensos a la incidencia de agentes externos y a la contaminación del medio ambiente , lluvias , a variaciones en la temperatura , en especial cuidado de la interacción con la lluvia que es un factor , que se evita por los daños que puede presentar , es importante por tanto el uso de los empaques para minimizar los daños , debido a las interacciones con estos agentes externos.

3.20. Designación de Empaques.

De acuerdo con (Caballero & Pizarro, 2017), los empaques deben ser fabricados con elastómeros o polímeros que cumplan con las características especificadas en la norma NTC 1759, y con una designación BK710, las designaciones vienen dadas por su tipo.

3.21. Empaque Sumergidos en Aceite Vegetal.

En la actualidad, los estudios relacionados con los empaques sumergidos en los aceites vegetales son escasos, uno de ellos, por ejemplo, es el de Wilhem et al (2015), que analiza la compatibilidad de los empaques de fluoro silicona y nitrilo con los aceites vegetales FR3, Biovolt. Los autores realizaron una prueba de resistencia química, prueba de máximo cambio de número de acidez, prueba de máximo cambio de la viscosidad a 40°C y prueba de máximo cambio del factor de disipación a 90°C.

Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

- Los transformadores de potencia están compuestos por dos bobinas, la primaria y la secundaria. La relación de vueltas del hilo de cobre entre el devanado primario y el secundario indicará la relación de transformación. Sirven para variar los valores de tensión de un circuito de corriente alterna, manteniendo su potencia. Su funcionamiento se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética.
- Los aceites dieléctricos vegetales no sólo tienen beneficios ambientales, sino que contribuyen también a un mayor tiempo de vida útil del aislamiento, que es una parte fundamental del transformador.
- Los empaques de caucho natural tienen un excelente comportamiento en presencia de aceites minerales. En ese sentido, se deduce que su aplicación dentro de la línea de aceites dieléctricos naturales debería tener resultados favorables, o incluso mejores que los adquiridos con el dieléctrico mineral, debido a que ambos son elementos naturales.
- Las normativas vigentes diseñadas en pro de la sostenibilidad ambiental no solo contribuyen al derecho de los ciudadanos a vivir en un entorno saludable sin exponerse a elementos contaminantes, sino que también permiten obtener mayor ventaja del 100% de la ganancia proporcionada por la generación distribuida.
- Los estudios de compatibilidad realizados en los empaques (responsables de la estanqueidad al aire) con aceites dieléctricos vegetales son un aporte importante en la búsqueda de mejoras para mantener los aceites en buen estado, debido a que estos fluidos son propensos a la oxidación.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda que las empresas de distribución de energía utilicen transformadores con aceite aislante vegetal, en vista de las ventajas económicas y ambientales que genera.
- Se recomienda realizar capacitaciones sobre la incidencia de los

transformadores con aceite vegetal, con el fin de masificar la información y concientizar la importancia que tiene para el ambiente y la población.

- Es importante que los estudiantes realicen proyectos de investigación sobre la implementación de ésteres naturales, en relación con los minerales, y que funcionen como punto de partida para ejecutar acciones a nivel micro y macro, con el fin de lograr beneficios ambientales y económicos para el país.

Referencias

- Agudelo, S. (2015). *Evaluación técnica para la activación de tierra fuller contaminada con aceite dieléctrico*. Tesis de Grado. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/3080>
- Argueta, C., Contreras, F., & Guardado, O. (2017). *Análisis de causas y efectos producidos por el deterioro del aceite dieléctrico para transformadores pad mounted y su relación con el índice de fallas*. Tesis de Grado. Universidad de El Salvador. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14442/1/An%C3%A1lisis%20de%20causas%20y%20efectos%20producidos%20por%20el%20deterioro%20del%20aceite%20diel%C3%A9ctrico%20para%20transformadores%20pad%20mounted%20y%20su%20relaci%C3%B3n%20con%20el%20%C3%ADndice%20de%20fal>
- Astudillo, .. C. (Enero de 2008). *Análisis técnico y económico para la reparación o reemplazo de transformadores de potencia*. Tesis de Grado. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/787/1/CD-1225.pdf>
- Benavides, A. (2004). *Optimización de aislamientos para Transformadores de Distribución*. Tesis de Grado. Tecnológico de Monterrey, Monterrey. Obtenido de https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/568799/BenavidesG_arza_TesisMaestria.pdf?sequence=11
- Caballero, P., & Pizarro, C. (2017). *Análisis comparativo de los materiales utilizados en transformadores de distribución sumergidos en aceite vegetal*. Universidad de la Costa. Tesis de Grado. Barranquilla, Colombia. Obtenido de <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/242/1045676774%20-1045725693.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Crespo, G., García, Z., Cabrera, J., & A, P. (2020). *Estimación del tiempo de vida útil restante en transformadores de fuerza a partir de la despolimerización de la celulosa del aislamiento*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/4455/445562743009/html/>

- De Máquinas y Herramientas. (2013). *Devanados en el Transformador*. Obtenido de Recuperado de <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-electricas-y-accesorios/transformadores-electricos>
- Dominguez, G. (2019). *Medición de Resistencia Eléctrica en Transformadores*. Obtenido de [fotografía]: Recuperado de https://www.editores-srl.com.ar/revistas/ie/348/reflex_instrumentos_para_mediciones_de_resistencia_electrica
- Ecured. (2017). *Método de precolación*. Recuperado de <https://www.ecured.cu/Percolaci%C3%B3n#/media/File:Percolacion09.jpg>
- ENDESA. (2021). *Transformador eléctrico*. Obtenido de <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educacion/recursos/corrientes-alternas-con-un-transformador-electrico>
- Gallo, E. (2005). Diagnóstico y Mantenimiento de Transformadores en Campo. 164. Obtenido de <https://isbn.cloud/9789589038512/diagnostico-y-mantenimiento-de-transformadores-en-campo/>
- Globecore . (2015). *Equipamiento de regeneración de aceites del transformador* . Obtenido de <https://es.globecore.com/productos/sistemas-de-regeneracion-de-aceite-de-transformadores/equipamiento-de-regeneracion-de-aceite-d>
- Hernández, Y. A. (2017). *Pruebas de Potencial Inducido*. Obtenido de [fotografía]: Recuperado de <https://www.sectorelectricidad.com/16887/pruebas-de-potencial-aplicado-vlf-voltaje-a-baja-frecuencia/>
- Huerta, G. (2020). *Tipos de enfriamiento de transformadores*. Obtenido de <https://siticed.com.mx/2020/01/30/tipos-de-enfriamiento-de-transformadores/>
- IEEE. (2008). *Métodos de regeneración tradicionales* . Obtenido de <https://site.ieee.org/ecuador/>
- INEN. (Enero de 2014). *Determinación del punto de inflamación método de Pensky-Martens en vaso cerrado*. Obtenido de

https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_iso_2719.pdf

INTEC . (2004). *Diagrama esquemático del equipo*. Obtenido de [Imagen]:
Recuperado de

http://www.tecsaqro.com/tecsa/Pruebas_subestaciones/aceite.pdf

INTEC. (2004). *Electrodos planos distanciados 2.5mm*. Obtenido de [Imagen]:
Recuperado de

http://www.tecsaqro.com/tecsa/Pruebas_subestaciones/aceite.pdf

INTEC. (2004). *Prueba de rigidez dieléctrica del aceite* . Obtenido de
http://www.tecsaqro.com/tecsa/Pruebas_subestaciones/aceite.pdf

INTEC. (2004). *Pruebas de relación de transformación* . Obtenido de
<file:///C:/Users/sroja/Downloads/PRUEBA%20DE%20RELACION%20DE%20TRANSFORMACION.pdf>

Jiménez, C. A. (2018 de 2018). *Calor y Clorimetría*. Tecnológico de Costa Rica
. Obtenido de

<https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10196/Calor%20y%20calorimetr%C3%ADa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Jimenez, G., & Gómez, G. (2016). *Comportamiento de los aislamientos sólidos de transformadores* . Obtenido de

<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5710303.pdf>

Lufisur . (2021). *Degradación de aceites industriales* . Obtenido de [imagen]:
Recuperado de <https://www.lufisur.es/factores-degradacion-lubricantes-industriales/>

Meprem Electric S.A . (2022). *Pruebas de Relación de Transformación* .
Obtenido de [fotografía]: Recuperado de
<http://meprem.com.ec/index.php/pruebas-electricas>

Meprem Electric S.A. (2022). Pruebas de aumento de temperatura.
Recuperado de <http://meprem.com.ec/index.php/pruebas-electricas>

Molina, N. (2014). *Montaje industrial para medir constante dieléctrica* .
Obtenido de [Imagen]: Recuperado de
https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Montaje-experimental-para-medir-la-constante-dielectrica_fig2_263410647

- Peña, H., & Prentice, J. (2010). *Normas de transformadores de distribución*. Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2195/12/UPS-GT000157.pdf>
- Quitiaquez, W., Simbaña, A., Simbaña, I., Isaza, C., Nieto, C., Quitiaquez, P., & Toapanta, F. (2019). Análisis Comparativo entre el Aceite Mineral y el Aceite Vegetal Utilizados como Dieléctricos y Refrigerantes para Transformadores de Potencia. *Energía*. Obtenido de <https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/338/323>
- Santisteban, A. (2015). Estudio de fluido-termico de aceites biodegradables en un transformador de potencia. (*Tesis de Mestría*). Universidad de Cantabria, Santander. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/7712/379668.pdf;sequence=1>
- Sanz, F. (2017). *Herramientas de diagnóstico para evaluar el estado de aceites dieléctricos biodegradables*. Obtenido de https://oa.upm.es/52153/1/FRANCISCO_SANZ_PEREZ.pdf
- Suárez, J. (2020). *Ánalisis de las propiedades eléctricas de aceites vegetales y minerales utilizados en transformadores de distribución*. Tesis de Grado. Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga. Obtenido de <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/6821/1/T-001521.pdf>
- Velasco, M. (2015). *Diseño y Optimización del Sistema de Control y Fuerza para pruebas de vacío y cortocircuito en forma paralela en transformadores monofásicos y trifásicos mediante el uso del ION 7650, Hipotronic y Logo*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/40097>

Glosario

ASTM: Sociedad americana para pruebas y materiales.

IEEE: Instituto de ingenieros eléctrico y electrónicos.

Pirolisis: Es la degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno.

Hidrolisis: Se define como una reacción química de las moléculas de H₂O.

IEC: Comisión electrotécnica internacional.

Precolación: En física lo refieren como al minucioso de fluidos a través de materiales porosos.

Dieléctricos: Que es un aislante o que no conducen electricidad.

Tierra fuller: Material inorgánico absorbente.

Papel kraft: Papel a base de residuos de distintos tipos de madera.

ISO: Son las siglas de la organización internacional de normalización.

PCB: Bifenilo policlorado.



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Rojas Díaz, Bécquer Steven** con C.C: 0803124759 autor del Trabajo de Titulación **Análisis comparativo entre el aceite mineral y aceite vegetal utilizado como fluido dieléctrico y refrigerante en transformadores de distribución**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Eléctrico Mecánica** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 9 de Marzo del 2022

Rojas Díaz, Bécquer Steven

C.C: 0803124759

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Análisis comparativo entre el aceite mineral y aceite vegetal utilizado como fluido dieléctrico y refrigerante en transformadores de distribución		
AUTOR(ES)	Rojas Díaz, Bécquer Steven		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Philco Asqui, Luis Orlando		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería Eléctrico Mecánica		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Eléctrico Mecánico		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	9 de marzo del 2022	No. DE PÁGINAS:	53
ÁREAS TEMÁTICAS:	Máquina eléctrica, Distribución eléctrica,		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Aceite vegetal, Minerales, Transformador, Dieléctricos, Refrigerantes.		
<p>El presente trabajo de titulación está enfocado a analizar y comparar características de los aceites dieléctricos vegetales y los aceites minerales que se utilizan como refrigerantes de transformadores en el sector eléctrico, con el fin de examinar sus componentes y determinar la incidencia que tiene cada uno en el ambiente, en la vida útil del transformador y el nivel de peligro que representan. Para tal efecto, se llevó a cabo una investigación cuantitativa deductiva para identificar eficiencia y confiabilidad del aceite como refrigerante en transformadores de potencia. También se aplica el método descriptivo, con el fin de detallar principios y las propiedades de los aceites vegetales cuentan con mayor rigidez dieléctrica, tienen mayores beneficios económicos, menor peligro de generar incendios y son más beneficiosos para lograr el óptimo funcionamiento de los transformadores de distribución eléctrica. La aportación de este trabajo es determinar la capacidad dieléctrica refrigerante de los aceites vegetales con la capacidad de los aceites minerales derivados del petróleo, en transformadores de potencia eléctrica.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593982386746	E-mail: srojas.18@hotmail	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: Palacios Melendez, Edwin Fernando		
	Teléfono: +593 96 274 5157		
	E-mail: edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			