



UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL

CARRERA:

INGENIERIA AMBIENTAL

OPTIMIZACION DEL TRATAMIENTO DEL ACEITE DIELECTRICO DE LOS
TRANSFORMADORES ELECTRICOS POR FILTRACION

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Ambiental

AUTORES:

ARTURO NELSON CLAVIJO MENA

CARLOS VICTOR SOTO VÁSQUEZ

TUTOR:

ING. MARCELO BERRONES RIVERA, M. I. A.

Guayaquil-Ecuador

2024

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, ARTURO NELSON CLAVIJO MENA con documento de identificación No. 0952747483 y CARLOS VICTOR SOTO VÁSQUEZ con documento de identificación No. 0932110430; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 26 de febrero del año 2024.

Atentamente,



ARTURO NELSON CLAVIJO MENA

C. C. No. 0952747483



CARLOS VICTOR SOTO VÁSQUEZ

C. C. No. 0932110430

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, ARTURO NELSON CLAVIJO MENA con documento de identificación No. 0952747483 y CARLOS VICTOR SOTO VÁSQUEZ con documento de identificación No. 0932110430, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo experimental denominado: "OPTIMIZACION DEL TRATAMIENTO DEL ACEITE DIELECTRICO DE LOS TRANSFORMADORES ELECTRICOS POR FILTRACION", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO AMBIENTAL, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 26 de febrero del año 2024

Atentamente,



ARTURO NELSON CLAVIJO MENA

C. C. No. 0952747483



CARLOS VICTOR SOTO VÁSQUEZ

C. C. No. 0932110430

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.

Yo, Marcelo Berrones Rivera con documento de identificación No. 0914078290, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: OPTIMIZACION DEL TRATAMIENTO DEL ACEITE DIELECTRICO DE LOS TRANSFORMADORES ELECTRICOS POR FILTRACION, realizado por Arturo Nelson Clavijo Mena con documento de identificación No. 0952747483 y por Carlos Víctor Soto Vásquez con documento de identificación No. 0932110430, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción tesis de titulación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 26 de febrero del año 2024

Atentamente,



Ing. Marcelo Berrones Rivera, M. I. A.

C. C. No. 0914078290

DEDICATORIA

Al concluir esta gran etapa de nuestras vidas queremos dar nuestro gran agradecimiento a Dios y a nuestras familias también para expresar nuestro gran agradecimiento al Ingeniero Arturo Clavijo Rosero y al Ingeniero Jorge Palacios por brindarnos su ayuda y conocimiento durante toda la etapa de este proyecto siendo pilares fundamentales para nosotros, y ampliar la curiosidad por el mundo eléctrico y poder entrelazarlo con la Carrera de Ingeniería Ambiental.

Nelson Arturo Clavijo Mena

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer de todo corazón a mi madre Abg. Silvia Jacqueline Mena Mueckay y a mi padre Ing. Arturo Rodrigo Clavijo Rosero por ser mi motor para impulsar mis proyectos y metas que me propongo y que es la que me enseñó a nunca rendirme, por otra parte, mis hermanas, Yaiza Clavijo y Valeria Coello son mis ejemplos de que nuestra familia no es de rendirse, y que siempre nos levantamos con más fuerza y damos lo mejor de nosotros y por eso son mi inspiración para siempre mejorar.

Nelson Arturo Clavijo Mena

DEDICATORIA

Expreso mi profundo agradecimiento a mi familia, amigos y pareja, cuyo respaldo constante ha sido fundamental en mi trayectoria. Su presencia ha sido una fuente de fortaleza y motivación inquebrantable a lo largo de este proceso. Reconozco el valor de su apoyo incondicional, el cual ha enriquecido mi camino con momentos de alegría y ánimo. A mi madre, agradezco su amor y compañerismo, fundamentales en los momentos difíciles y esenciales en los momentos de felicidad. Este logro no sería posible sin el amor, apoyo y comprensión de quienes me rodean. Mi más sincero agradecimiento y dedicación están dirigidos hacia ellos.

Carlos Víctor Soto Vázquez

AGRADECIMIENTO

Quiero mi más profundo agradecimiento a mi madre la Ing. Vicky Lorena Vázquez Baquerizo por ser mi pilar y mi impulsadora para conseguir mis metas, logros y mayor fuente de inspiración, a mi abuela Gladys Elvira Baquerizo Ortega que, aunque no este entre nosotros, desde el cielo me da el apoyo incondicional que me dio en vida.

Carlos Víctor Soto Vázquez

RESUMEN

En resumen, el proceso de optimización para aceites dieléctricos busca reducir costos de mano de obra y materiales mediante la mejora del proceso de termovacío. Este método implica la aplicación de altas temperaturas, no superiores a 1000 grados centígrados, en un entorno de vacío controlado para eliminar la humedad presente en el aceite dieléctrico de los transformadores, resultando en un aceite desprovisto de humedad. Nuestro enfoque de optimización se centra en la etapa final del circuito de termovacío, donde se propone la incorporación de un filtro compuesto por material absorbente. Este filtro se diseñó para restaurar parámetros clave como el color, olor, la rigidez eléctrica, etc., que son cruciales para garantizar la no conductividad del aceite y así mantener la integridad de los transformadores. Nuestra investigación se benefició del asesoramiento de expertos en ingeniería eléctrica y la colaboración con ingenieros especializados, quienes nos guiaron en la ejecución del experimento. Abordaremos en detalle el impacto ambiental de este proceso de optimización, explorando diversas etapas del ciclo de vida del aceite dieléctrico y destacando la importancia de su tratamiento adecuado. Se discutió los factores que aceleran su degradación y cómo la falta de tratamiento puede resultar en la generación de residuos de equipos y aceite inutilizable destinado a la combustión, lo que representa un desafío significativo en términos ambientales y operacionales para la industria eléctrica.

Palabras Claves: Aceite dieléctrico, filtro, optimización, termovacío, normas, sílice gel

ABSTRACT

In summary, the optimization process for dielectric oils seeks to reduce labor and material costs by improving the thermovacuum process. This method involves the application of high temperatures, not exceeding 1000 degrees Celsius, in a controlled vacuum environment to remove the moisture present in transformer dielectric oil, resulting in an oil devoid of moisture. Our optimization approach focuses on the final stage of the thermovacuum circuit, where the incorporation of a filter composed of absorbent material is proposed. This filter will be designed to restore key parameters such as color, odor, electrical stiffness, etc., which are crucial to ensure the non-conductivity of the oil and thus maintain the integrity of the transformers. Our research benefited from the advice of electrical engineering experts and collaboration with specialized engineers, who guided us in the execution of the experiment. We addressed in detail the environmental impact of this optimization process, exploring various stages of the dielectric oil life cycle and highlighting the importance of its proper treatment. We discussed the factors that accelerate its degradation and how the lack of treatment can result in the generation of waste equipment and unusable oil destined for combustion, which represents a significant environmental and operational challenge for the industry.

Keys words: Dielectric oil, filter, optimization, thermovacuum, standards, silica gel

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	I
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	II
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE DE CONTENIDO	X
INDICE DE FIGURAS	XIII
INDICE DE TABLAS.....	XVI
CAPITULO I	1
1.1. PROBLEMA DE ESTUDIO.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Delimitación	5
1.4. OBJETIVOS	6
1.4.1. Objetivo General	6
1.4.2. Objetivos Específicos.....	6
1.5. Marco hipotético	7
1.5.1. Marco hipotético general	7
1.5.2. Marco hipotético específico.....	7
CAPITULO II.....	8

2.1.	Composición química de los aceites minerales:	8
2.2.	Hidrocarburos Isoparafínicos	9
2.3.	Hidrocarburos Nafténicos	9
2.4.	Hidrocarburos Aromáticos	10
2.5.	Compuestos Minoritarios	11
2.6.	Proceso en el que se degradan los aceites minerales que son aislantes	12
2.7.	Factores básicos del deterioro del aceite aislante	12
2.8.	Factores de Deterioro: Oxígeno	13
2.9.	Aceite Dieléctrico en Transformadores Eléctricos	13
2.10.	Procesos de Regeneración de Aceite Dieléctrico	14
2.11.	Optimización de Procesos de Tratamiento de Aceite Dieléctrico	14
2.12.	Factores Críticos y Desafíos	14
2.13.	Propiedades del aceite dieléctrico	15
2.14.	Impacto en la Industria Eléctrica	16
2.15.	NORMA ASTM D-3487	16
2.16.	Color: Colorimetría Método astm-d-1500	17
2.17.	Rigidez dieléctrica: método ASTM D877- procedimiento A	17
2.18.	Contenido de humedad: Contenido de Agua ASTM-D1533	17
2.19.	Número Acido	17
2.20.	Tensión interfacial	17
2.21.	Densidad relativa	18
2.22.	Que es índice de calidad	18
CAPITULO III		19
3.1.	MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1.1.	Normativa Para Utilizar	19
3.1.2.	Consultas técnicas sobre aceites aislantes	21
3.1.3.	Características técnicas de la elaboración del filtro	22

3.1.4. Características y Detalles del Proceso de Termovació para el tratamiento de aceites aislantes.....	23
3.1.5. Método de toma de muestra	28
CAPITULO IV.....	29
4.1. Características y parámetros de la muestra del aceite dieléctrico antes del tratamiento por termovació y filtrado	29
4.2. Datos del proceso de creación del recipiente filtro	30
4.3. Preparación de los filtros con la tierra filtrante	37
4.3.1. Preparación del sello de caucho para la tapa del filtro	39
4.4. Proceso de filtrado	42
4.4.1. Proceso de Filtrado y segundo día de recirculación.	47
4.4.2. Finalización del proceso de Recirculación y Filtrado.....	49
4.5. Análisis de datos	53
4.5.1. Comparación de resultados	55
4.6. Comprobación de hipótesis.....	63
CAPÍTULO V	67
5.1. Conclusiones.....	67
5.2. Recomendaciones.....	69
BIBLIOGRAFÍA	70
APÉNDICE/ANEXOS	72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Delimitación del espacio en el que se trabajó el proyecto experimental	6
Figura 2.- Imagen de Hidrocarburos Isoparafínicos	9
Figura 3: Imagen de Hidrocarburos Nafténicos	10
Figura 4.- Imagen de Hidrocarburos Aromáticos y Alquibencenos	10
Figura 5: - Imagen de Compuestos Minoritarios	11
Figura 6.- Gráfico de Factores básicos del deterioro del aceite aislante	13
Figura 7.- Consultoría.....	21
Figura 8.- Asesoramiento de un especialista sobre los aceites dieléctricos en los transformadores.	22
Figura 9.- Características específicas de la máquina de termovació.	24
Figura 10.- Motores destinados a la operación de la bomba de vacío.....	24
Figura 11.- Filtro de Pre-entrada	25
Figura 12.- Cámara de calentamiento.....	25
Figura 13.- Filtro de salida	26
Figura 14.- Bomba de succión.....	26
Figura 15.- Cámara de termovació	27
Figura 16.- Panel de control	27
Figura 17.- Filtro de Tierra Filtrante.....	32
Figura 18.- Diseño digital para el filtro	32
Figura 19.- Interior del recipiente filtro.....	33
Figura 20.- Se contacto a un mecánico, experto en tipos de soldadura debido a que el equipo iba a ser sometido a altas presiones.	33
Figura 21.- Tapa con seguro de sello tipo grifo	34
Figura 22.- Instrumento para la medición de la presión de fluidos	34
Figura 23.- Resguardo interno destinado a los filtros.....	35

Figura 24. - Introducción de los filtros con tierra filtrante en el contenedor.....	35
Figura 25. - Aplicación de una capa de pintura anticorrosiva.	36
Figura 26. - Verificación de las mediciones del filtro.....	37
Figura 27.- Presentación final del filtro.....	37
Figura 28.- Retiro de Tierra Filtrante usada	38
Figura 29.- Sílice Gel	38
Figura 30.- Introducción de la sílice gel en los filtros	39
Figura 31.- Medidas y ajustes al tapón de goma	40
Figura 32.- Culminación del sellado.....	41
Figura 33.- Diagrama de flujo del circuito	42
Figura 34.- Entrada del aceite al filtro	43
Figura 35.- Salida del aceite al galón	44
Figura 36.- Cierre de circuito	45
Figura 37.- Circuito completo	45
Figura 38.- Segundo día de recirculación.....	47
Figura 39.- Cambio de la sílice gel de los filtros.....	48
Figura 40.- Muestras del aceite tratado 08/02/2024	49
Figura 41.- Ultimo proceso de recirculación y filtrado	50
Figura 42.- Resultados finales	51
Figura 43.- Toma de muestras	52
Figura 44.- Muestra recolectada	52
Figura 45.- Aceite Dieléctrico antes del proceso	53
Figura 46.- Diagrama de barras de tensión interfacial.....	58
Figura 47.- Diagrama de barras de acidez	59
Figura 48.- Diagrama de barras del color	60
Figura 49.- Diagrama de barras de agua en aceite.....	61
Figura 50.- Diagrama de barras de la densidad relativa	61

Figura 51.- Diagrama de barras de la rigidez dieléctrica.....	62
Figura 52.- Diagrama de barras del índice de calidad	63
Figura 53.- Histograma del porcentaje de optimización.....	64
Figura 54.-Reporte de análisis	72
Figura 55.- Preparación del filtro propuesto.....	73
Figura 56.-Arrancando motor eléctrico	73
Figura 57.- Añadiendo los brazos para hacer presión.....	74
Figura 58.- Modelo del circuito	74
Figura 59.- Modelo del circuito conectado a la máquina de termovació	75
Figura 60.- Instalación del material filtrante al equipo previo a realizar pruebas	76
Figura 61.- Foto completa del circuito	76
Figura 62.- Comparación de muestras	77
Figura 63.- Máquina de termovació	77
Figura 64.-Botellas de vidrio color ámbar	78
Figura 65.-Revisión de las medidas aplicadas para la construcción del filtro.....	79
Figura 66.- Tierra contaminada	79
Figura 67.-Colocación del material filtrante para la parte experimental del proyecto ...	80
Figura 68.-Rotulación de muestras	80
Figura 69.-Observando la cantidad de aceite dieléctrico dentro de la máquina de termovació	81
Figura 70.-Resultados del aceite tratado después de pasar por el equipo propuesto.....	82
Figura 71.-Criterios estándar del aceite dieléctrico	83

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Etapas de la formación de lodo en los transformadores	12
Tabla 2.- Requisitos que deben cumplir los aceites aislantes.	19
Tabla 3.- Datos iniciales del aceite dieléctrico degradado.....	30
Tabla 4.- Resultados del aceite	54
Tabla 5.- Criterios de las s. D. Myres para la declaración de conformidad.....	55
Tabla 6.- Comparación del aceite dieléctrico	56

CAPITULO I

1.1. PROBLEMA DE ESTUDIO

Los transformadores eléctricos desempeñan un papel fundamental en la distribución de energía eléctrica al permitir la conversión de voltajes, facilitando la transmisión eficiente de electricidad a través de las redes de distribución. En este contexto, el aceite dieléctrico juega un papel esencial, actuando como aislante eléctrico y refrigerante para garantizar el funcionamiento adecuado de estos dispositivos.

Sin embargo, según el Comité Organizador del Área de Innovación y Desarrollo, S.L., (2020) con el paso del tiempo, este aceite puede sufrir deterioro debido a factores externos, lo que puede tener un impacto negativo en el rendimiento y en la vida útil de los transformadores haciendo que muchas viviendas se queden sin luz.

El verdadero problema que enfrentan las empresas eléctricas a nivel mundial, incluyendo a Ecuador, con la disposición final del aceite dieléctrico es la contaminación ambiental. La disposición inadecuada de este aceite puede resultar en la contaminación del suelo y del agua, lo que a su vez afecta la salud de las personas y la biodiversidad. A nivel mundial, las empresas eléctricas buscan soluciones sostenibles y responsables para el manejo y disposición final de este tipo de residuos, con el fin de reducir su impacto ambiental y promover prácticas más amigables con el entorno. En Ecuador, este desafío se ve agravado por la necesidad de cumplir con regulaciones ambientales más estrictas y de encontrar alternativas sostenibles para el tratamiento del aceite dieléctrico usado.

El problema de estudio que se plantea se centra en la optimización de los procesos de tratamiento de aceite dieléctrico con el objetivo de reducir los costos operativos y mejorar la eficiencia energética de los transformadores eléctricos. Esto implica la identificación de enfoques que permitan mantener o mejorar la calidad del aceite dieléctrico mientras se minimiza los recursos empleados en la regeneración del aceite.

Para abordar este problema, se requiere realizar una serie de investigaciones interconectadas. En primer lugar, se debe llevar a cabo un análisis detallado de la calidad del aceite dieléctrico en transformadores y su influencia en el rendimiento y la vida útil de estos dispositivos. Esto incluye la identificación de los factores críticos que afectan la

calidad del aceite, como la presencia de impurezas, productos de descomposición y la humedad.

En segundo lugar, es esencial llevar a cabo una revisión exhaustiva de las técnicas y tecnologías actualmente disponibles para la reutilización del aceite dieléctrico. Esto implica el estudio de procesos de filtración, secado, desgasificación y otras técnicas de tratamiento utilizadas en la industria.

La siguiente etapa consiste en desarrollar estrategias para optimizar los procesos de regeneración de aceite dieléctrico. Estas estrategias podrían abarcar desde la implementación de mejores prácticas en la gestión del proceso hasta la adopción de tecnologías más eficientes o la mejora de los procedimientos de control de calidad.

El resultado de esta investigación tiene el potencial de hacer una contribución valiosa a la industria eléctrica al aumentar la eficiencia energética y reducir los costos operativos, al tiempo que se prolonga la vida útil de los transformadores. Esto posee implicaciones significativas para la sostenibilidad y el desempeño a largo plazo de la infraestructura eléctrica.

1.2. Justificación

Desde un punto de vista ambiental en la actualidad, la reutilización del aceite dieléctrico en transformadores y equipos eléctricos presenta beneficios ambientales significativos. En primer lugar, al reutilizar este tipo de aceite, se disminuye la cantidad de desechos peligrosos que de otra manera terminarían en vertederos o serían incinerados, evitando la contaminación del suelo, agua y del aire.

Esta práctica contribuye a la protección del medio ambiente al reducir la generación de residuos tóxicos, asimismo, la reutilización del aceite dieléctrico forma parte de la economía circular, al extender la vida útil de un recurso, reduciendo la necesidad de obtener nuevos materiales y minimizando el impacto ambiental relacionado con la extracción y producción de aceites dieléctricos nuevos y de esta manera, se promueve un modelo sostenible que maximiza el valor de los recursos existentes.

Dando una perspectiva metodológica, esta investigación impulsará el campo al aplicar y desarrollar métodos para evaluar la calidad del aceite dieléctrico y evaluar

distintos enfoques de tratamiento. Según Esteban & Piñapil (2022) esto comprenderá la realización de pruebas en entornos de laboratorio, análisis de componentes químicos y físicos, pruebas de campo y la implementación de modelos computacionales. Estas metodologías robustecerán la base de investigación en el ámbito de la regeneración del aceite dieléctrico, proporcionando datos empíricos sólidos.

En lo que respecta a su relevancia práctica, este estudio conlleva beneficios concretos para la industria eléctrica. Según Ronderos & Guerra, (2020) la optimización de los procedimientos de tratamiento del aceite dieléctrico puede disminuir los gastos operativos relacionados con el mantenimiento de transformadores eléctricos. Esto se torna esencial para las empresas e instituciones que dependen de estos equipos para asegurar un suministro eléctrico confiable.

Adicionalmente, la optimización promueve la eficiencia energética y la sostenibilidad al reducir el consumo de energía y recursos en los procesos de tratamiento. Según Barajas C. et al (2022) esto va con los objetivos mundiales de conservación de recursos y reducción de emisiones de carbono es crucial en el contexto actual, marcado por la inquietud del cambio climático.

En primer lugar, la eliminación adecuada del aceite dieléctrico contribuye a la preservación del entorno natural. Este tipo de aceite a menudo contiene sustancias químicas que pueden ser perjudiciales para la vida acuática y terrestre si se liberan de manera incontrolada. Al filtrar y tratar de manera responsable este aceite, se reduce el riesgo de contaminación ambiental y se protege la biodiversidad en los ecosistemas circundantes.

Además, la correcta disposición final del aceite dieléctrico es crucial para la seguridad y bienestar de los trabajadores. El manejo inadecuado de este tipo de sustancias puede tener consecuencias negativas para la salud humana, incluyendo posibles efectos tóxicos o irritantes. Al implementar procesos de filtrado y tratamiento eficientes, se minimizan los riesgos asociados con la exposición a productos químicos peligrosos, garantizando un entorno laboral más seguro y saludable.

Asimismo, la adopción de prácticas responsables en la disposición final del aceite dieléctrico puede contribuir a la sostenibilidad a largo plazo de la industria. La

reutilización o reciclaje adecuado de este aceite puede reducir la dependencia de recursos naturales al tiempo que disminuye la generación de residuos. Esto se alinea con los principios de economía circular y promueve un enfoque más consciente y sostenible en el uso de recursos en el ámbito industrial.

Adicionalmente, la implementación de tecnologías y procesos avanzados para el filtrado del aceite dieléctrico puede resultar en beneficios económicos, la mejora en la eficiencia y la durabilidad del aceite puede extender la vida útil de los equipos eléctricos, reduciendo así los costos asociados con el reemplazo frecuente de aceites y equipos, esto contribuye a la optimización de recursos y a la eficiencia económica de las operaciones industriales.

La disposición final responsable del aceite dieléctrico no solo preserva el medio ambiente al prevenir la contaminación, sino que también salvaguarda la salud de los trabajadores, promueve la sostenibilidad a largo plazo de la industria y presenta oportunidades económicas a través de prácticas más eficientes y conscientes.

Además, la utilización repetida del aceite dieléctrico puede generar significativos ahorros económicos para las comunidades. El proceso de purificación y reacondicionamiento del aceite permite su continuo empleo en dispositivos eléctricos, evitando la necesidad constante de adquirir nuevo material dieléctrico. Estos ahorros económicos pueden ser redirigidos hacia otras necesidades comunitarias, como mejoras en infraestructuras locales, servicios públicos o iniciativas sociales, promoviendo así el desarrollo y mejorando la calidad de vida de los habitantes.

La reutilización del aceite dieléctrico en entornos comunitarios también puede desempeñar un papel crucial en la mitigación de los impactos ambientales adversos vinculados con la inadecuada disposición de este tipo de residuos. La implementación de prácticas de gestión apropiadas contribuye a la disminución de las emisiones contaminantes, salvaguardando la salud de la comunidad y preservando el entorno. En resumen, la reutilización del aceite dieléctrico se configura como una estrategia integral que beneficia tanto al medio ambiente como a las comunidades locales.

La reintegración del aceite dieléctrico no solo constituye una perspectiva medioambientalmente consciente, sino también una oportunidad para la generación de

empleo. La ejecución de procedimientos de purificación y reacondicionamiento del aceite implica la participación de profesionales capacitados en ingeniería química y eléctrica, así como técnicos especializados en el mantenimiento de equipos eléctricos. Este proceso de reutilización no solo exige destrezas especializadas, sino que también conlleva la creación directa de empleo para individuos con experiencia en estos campos, contribuyendo de manera significativa a la generación de puestos de trabajo especializados.

Adicionalmente, la promoción de prácticas sostenibles en la gestión del aceite dieléctrico puede propiciar la creación de empleo en sectores afines, como el diseño e implementación de sistemas de reciclaje y el avance de tecnologías más eficientes. El incremento en la demanda de servicios vinculados con la reutilización del aceite dieléctrico puede estimular la capacitación y contratación de profesionales en diversas disciplinas, desde la investigación y desarrollo hasta la ingeniería ambiental.

En un ámbito más amplio, la reintegración del aceite dieléctrico puede contribuir al desarrollo de la economía local al incentivar la fundación de pequeñas y medianas empresas especializadas en la gestión sustentable de este recurso.

1.3. Delimitación

La investigación experimental se llevó a cabo en las instalaciones de una empresa eléctrica que se nos facilitó y está ubicada en Samborondón con las siguientes coordenadas $X=-2.036201$, $Y=-79.843422$. La selección de este sitio se fundamentó en la disponibilidad de infraestructura especializada y la pertinencia de sus condiciones operativas para el estudio de los aceites dieléctricos en transformadores.

Figura 1.- Delimitación del espacio en el que se trabajó el proyecto experimental



Fuente: Google Earth (2024)

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

- Optimizar el proceso del tratamiento del aceite dieléctrico mediante técnica de filtrado para la mejora del rendimiento y la vida útil de los transformadores eléctricos.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Demostrar la reutilización del aceite dieléctrico con el resultado del tema experimental para así obtener una economía circular.
- Determinar el impacto del tratamiento de filtrado en las propiedades dieléctricas del aceite, analizando la resistividad, la rigidez dieléctrica y otras características relevantes.
- Identificar las impurezas y productos de descomposición presentes en el aceite dieléctrico antes y después de la aplicación de la técnica de filtrado.

1.5. Marco hipotético

1.5.1. Marco hipotético general

- ¿Cuáles son los efectos del tratamiento del aceite dieléctrico mediante técnicas de filtrado en el rendimiento y la vida útil de los transformadores eléctricos, y cómo se puede optimizar este proceso para maximizar sus beneficios?

1.5.2. Marco hipotético específico

- ¿Cómo influye la reutilización del aceite dieléctrico en la implementación de un modelo de economía circular en el contexto de un tema experimental específico?
- ¿Cuál es el impacto potencial de la optimización de estos procesos en la eficiencia energética y la sostenibilidad de la infraestructura eléctrica a largo plazo?
- ¿Cuáles son las mejores prácticas y estrategias recomendadas para implementar la optimización de procesos de tratamiento de aceite dieléctrico en transformadores eléctricos a nivel industrial?

CAPITULO II

2. MARCO TEORICO REFERENCIAL

Esta investigación se centra en la mejora de la calidad de vida del aceite dieléctrico, enfocándose en optimizar la disposición final de dicho aceite con el propósito de reducir la emisión de gases nocivos tanto para el entorno ambiental como para los trabajadores que manipulan el aceite. Asimismo, se busca proporcionar a las empresas nuevas alternativas para la gestión responsable de los residuos resultantes.

2.1. Composición química de los aceites minerales:

Según Ernesto Gallo (2010) los aceites aislantes que tienen sus bases a partir del petróleo son un conjunto de hidrocarburos isoparafínicos, nafténicos y aromáticos que tienen entre 16 y 22 moléculas, logradas a través de procedimientos de destilación y refinación, contribuyendo cada una propiedad deseable y que con ello al terminar cumpla las cuatro funciones estándar que debe tener un aceite que es aislante:

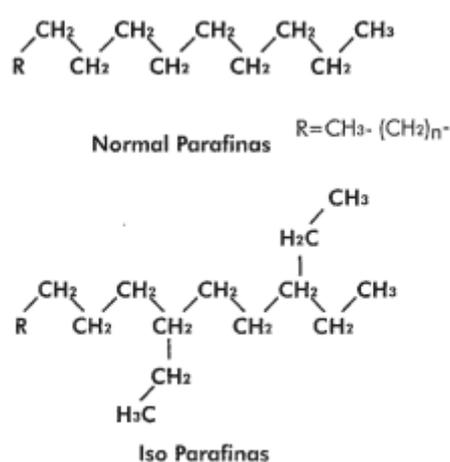
- Exhibir excelentes propiedades como aislante eléctrico.
- Facilitar la refrigeración eficiente del transformador mediante la disipación del calor inherente al proceso de transformación.
- Salvaguardar las partes internas del transformador.
- Poseer características mineralógicas que favorezcan su fluidez y viscosidad a temperaturas bajas, asegurando así un rendimiento óptimo en diversas condiciones.

Demostrar una notable estabilidad frente a la oxidación, gracias a la presencia de los niveles adecuados de inhibidores naturales y/o sintéticos. Estos compuestos desaceleran el proceso de oxidación del aceite aislante, previniendo así la formación de poliésteres pesados, conocidos como lodos. Cuando el aceite no cumpla con estas funciones, es de importancia que la unidad sea sometida a mantenimiento para asegurar la vida útil del transformador y mantener alto el índice de confiabilidad.

2.2. Hidrocarburos Isoparafínicos

Según Ernesto Gallo (2010) los compuestos pertenecientes a la familia de los alcanos, con la fórmula general C_nH_{2n+2} , consisten en cadenas abiertas que pueden presentar ramificaciones laterales en su estructura, estos compuestos exhiben una propiedad particular en su punto de fluidez, el cual es menor que el de las parafinas, lo que facilita los movimientos de convección, además, debido a su alta saturación, poseen una notable estabilidad térmica y frente a la oxidación, presentan un índice de viscosidad elevado, así como un bajo poder solvente y un alto punto de fluidez, se caracterizan por tener una menor tendencia a la gasificación y, al mismo tiempo, son resistentes a la oxidación.

Figura 2.- Imagen de Hidrocarburos Isoparafínicos



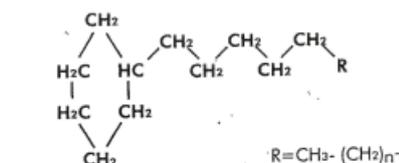
Fuente: Ernesto, G. (2010). Imagen de Hidrocarburos Isoparafínicos

2.3. Hidrocarburos Nafténicos

Conocidos también como cicloparafinas, estos compuestos, pertenecientes a la familia de los alcanos con la fórmula general C_nH_{2n} , exhiben una estructura caracterizada por grupos anulares compuestos por alrededor de 6 átomos de carbono. La mayoría de los componentes presentan una naturaleza cíclica con cadenas laterales que representan aproximadamente el 50-60%. Esta configuración cíclica y ramificada les otorga un menor punto de fluidez, un índice de viscosidad reducido y un mayor poder solvente en comparación con los alcanos lineales. Sin embargo, tienen una estabilidad térmica y a la

oxidación inferior a la de los compuestos parafínicos. Aunque comparten similitudes con los isoparafínicos, muestran una mayor estabilidad a la oxidación, una menor propensión a la formación de gases y carbones en presencia de descargas eléctricas, así como un bajo punto de fluidez y un coeficiente de expansión aceptable.

Figura 3: Imagen de Hidrocarburos Nafténicos

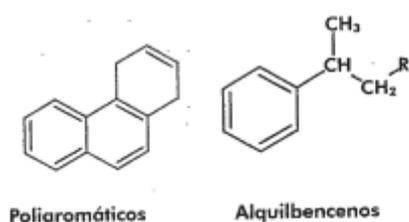


Fuente: Ernesto, G. (2010). Imagen de Hidrocarburos Nafténicos

2.4. Hidrocarburos Aromáticos

Según Ernesto Gallo (2010) los aromáticos que componen el aceite aislante exhiben estructuras anulares con una valencia de carbono insaturada, estas estructuras aromáticas muestran ramificaciones que les confieren una relativa estabilidad frente a la oxidación, y desempeñan un papel crucial como inhibidores naturales contra la oxidación del aceite; sin embargo, cuando estos inhibidores se agotan, el proceso de acidificación del aceite se acelera, y predominantemente, los componentes consisten en estructuras con anillos de benceno mono y poli anulares.

Figura 4.- Imagen de Hidrocarburos Aromáticos y Alquibencenos



Fuente: Ernesto, G. (2010). Imagen de Hidrocarburos Aromáticos y Alquibencenos

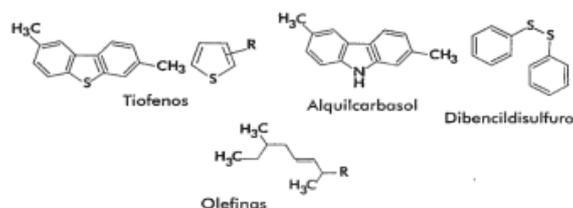
Estos componentes exhiben las siguientes características:

- Exhiben un coeficiente de expansión reducido.
- Aunque muestran una baja estabilidad ante la oxidación, tienen la capacidad de formar compuestos químicos estables que actúan como inhibidores naturales, retardando así la formación acelerada de lodos.
- Presentan un elevado poder solvente para lacas y resinas.
- Tienen una baja propensión a liberar átomos de hidrógeno en entornos con campos electromagnéticos elevados.
- Poseen una alta afinidad para mantener el agua tanto en solución como en suspensión.
- Exhiben un alto poder de solvencia para lodos.
- En el aceite aislante, su concentración se restringe entre el 4% y el 10% para evitar propiedades no deseadas. Su capacidad solvente y mayor polaridad pueden afectar significativamente a las resinas, lacas y barnices presentes en el transformador.

2.5. Compuestos Minoritarios

Según Ernesto Gallo (2010), como resultado del proceso de refinación del petróleo, se generan hidrocarburos y poliaromáticos sustitutos, así como trazas de compuestos organometálicos (0.5% - 3%), los cuales influyen en las propiedades y comportamientos del aceite de manera diversa. Algunos de estos compuestos pueden tener un carácter corrosivo que puede ocasionar daños en el cobre de los devanados, provocando la formación de sulfuros de cobre. Esta corrosión puede generar problemas significativos, especialmente en equipos de alto voltaje, y podría resultar en fallos debido a la afectación directa de las distancias dieléctricas.

Figura 5: - Imagen de Compuestos Minoritarios



Fuente: Ernesto, G. (2010). Imagen de Compuestos Minoritarios

2.6. Proceso en el que se degradan los aceites minerales que son aislantes

Según Ernesto Gallo (2010), el aceite aislante en los transformadores se ve afectado por diversos agentes que desencadenan un proceso de oxidación o acidificación. Estos agentes incluyen tanto catalizadores como aceleradores, los cuales promueven reacciones químicas en cadena.

Como resultado de estas reacciones, se producen diversos productos intermedios de oxidación que son altamente contaminantes. Inicialmente, aparecen alcoholes y aldehídos, los cuales pueden dar lugar a la formación de cetonas y ácidos orgánicos, que a su vez reaccionan entre sí para formar ésteres. Estos compuestos, a su vez, se activan y polimerizan, formando lodos que se acumulan en las fibras de la celulosa, los devanados, el núcleo y los radiadores del transformador.

Esta acumulación de lodos contribuye a la degradación acelerada de los componentes del transformador, lo que reduce su vida útil y puede incluso poner en riesgo su funcionamiento, aumentando la probabilidad de fallos en el equipo.

Tabla 1.- Etapas de la formación de lodo en los transformadores

Por oxidación natural de los hidrocarburos se forman ácidos orgánicos y ésteres con un diámetro medio menor de 0.03 micrones.
Esos ácidos y ésteres se unen para formar complejos moleculares de 0.03 a 0.05 micrones de diámetro medio.
Posteriormente, esos complejos moleculares se aglomeran para formar partículas de 0.05 a 1.5 micrones de diámetro medio.
Dichas partículas se precipitan sobre las paredes de los componentes del transformador.

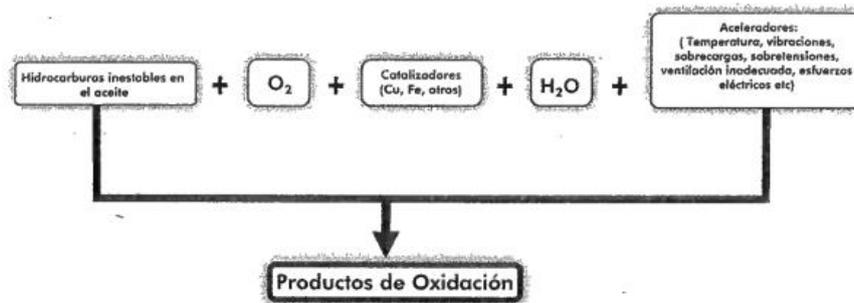
Fuente: Ernesto, G. (2010). Etapas de la formación de lodo en los transformadores

2.7. Factores básicos del deterioro del aceite aislante

Según Ernesto Gallo (2010) este aceite aislante tiene cierto grado de inestabilidad química, los cuales, en presencia de oxígeno, estos catalizadores en diferente condición

como el agua y el calor generan resultados como los famosos productos de oxidación del aceite, que son sustancias polares acidas que a largo plazo y su avance va a formarse en lodos.

Figura 6.- Gráfico de Factores básicos del deterioro del aceite aislante



Fuente: Ernesto, G. (2010). Gráfico de Factores básicos del deterioro del aceite aislante

2.8. Factores de Deterioro: Oxígeno

El oxígeno es una presente problemática en los transformadores en operación porque:

- Es imposible remover todo el O_2 , se queda un 0.25% lo cual es suficiente para oxidar el aceite aislante.
- Es uno de los gases de mayor solubilidad en el aceite 16%, y con mayor afinidad con el mismo.
- La degradación del papel.
- Los inhibidores naturales de O_2 que gradualmente deterioran con el tiempo.

2.9. Aceite Dieléctrico en Transformadores Eléctricos

En el contexto de transformadores eléctricos, el aceite dieléctrico cumple un papel de gran relevancia, ya que cumple la función de actuar como aislante eléctrico y al mismo tiempo, de refrigerante. Su desafío principal radica en la necesidad de mantener sus características dieléctricas intactas para asegurar el funcionamiento eficiente de estos dispositivos.

Con el paso del tiempo, el aceite dieléctrico se encuentra expuesto a diversos factores que pueden llevar a su degradación. Según Jefferson R. (2021) estos factores

incluyen la contaminación, la acumulación de subproductos de descomposición, la humedad y otros elementos que gradualmente socavan su calidad, este proceso de degradación puede tener un efecto perjudicial sobre el rendimiento de los transformadores eléctricos, acortando significativamente su vida útil.

2.10. Procesos de Regeneración de Aceite Dieléctrico

Para Hernán Henry Santisteban Chapoñan, (2023) un aspecto fundamental de esta regeneración radica en las múltiples técnicas y tecnologías disponibles para llevar a cabo este proceso, dichas técnicas comprenden la filtración, el secado, la desgasificación y una serie de otras metodologías. Cada una de estas técnicas posee sus respectivas ventajas y limitaciones, particularmente en lo que se refiere a su eficacia y su capacidad de promover la sostenibilidad.

2.11. Optimización de Procesos de Tratamiento de Aceite Dieléctrico

La optimización de los procesos de tratamiento de aceite dieléctrico adquiere un papel de importancia crucial en la industria eléctrica. Según Freire et al., (2023) su propósito primordial consiste en la reducción de los costos operativos asociados a la regeneración del aceite, sin comprometer la calidad de este ni la vida útil de los transformadores. En este proceso, se busca alcanzar un equilibrio entre eficiencia y sostenibilidad.

Un elemento esencial en esta optimización es la máquina de termovacío y Oscar Eduardo Robles Durón (2019) indica que ayudara a que elimine agua y partículas sólidas, de esta forma acelerando el proceso, y aumentando la rigidez dieléctrica que es el esperado resultado, también otra parte importante es la tierra Fuller y/o otros materiales filtrantes, ya que será un filtro previo al proceso de la máquina de termovacío, removiendo la mayoría del agua y la acidez del aceite dieléctrico aumentando su viscosidad.

2.12. Factores Críticos y Desafíos

La calidad del aceite dieléctrico se ve fuertemente influenciada por factores críticos, entre los que se incluyen la presencia de impurezas, la humedad y los productos de descomposición. Mantener estos factores bajo control es esencial para preservar la calidad del aceite.

Sin embargo, la optimización de los procesos de tratamiento de aceite dieléctrico no está separada de tener complicaciones. Por eso Luis G. y Manuel Z. (2022) indica que estos desafíos incluyen la variabilidad de los transformadores y sus condiciones de operación, así como la necesidad de equilibrar la calidad del aceite con la eficiencia del proceso.

2.13. Propiedades del aceite dieléctrico

- **Viscosidad:** La viscosidad se define como la resistencia que opone un fluido al movimiento sobre una superficie sólida. Según Luis Elmer Gonzales Arrasco (2021), a medida que la viscosidad del fluido aumenta, también lo hace la resistencia al desplazamiento dentro del transformador, lo que reduce la eficiencia de la función de refrigeración. Por consiguiente, los aceites dieléctricos deben tener una viscosidad baja para disipar eficazmente el calor generado durante el funcionamiento del transformador.
- **Punto de fluidez:** De acuerdo con la definición de Daniel & Tello (2019), el punto de fluidez es la temperatura a la cual el aceite deja de fluir al enfriarse, lo que resulta útil para distinguir entre diferentes tipos de aceites aislantes.
- **Punto de inflamación:** Según Ray F. (2020), el punto de inflamación indica la temperatura mínima a la cual el aceite emite suficientes vapores para formar una mezcla explosiva con el oxígeno del aire en presencia de una llama.
- **Color:** El color del aceite dieléctrico varía según la composición de los diferentes hidrocarburos. Por consiguiente, Emilio Segura Carballo et al. (2019) señalan que los aceites compuestos principalmente por hidrocarburos parafínicos e isoparafínicos son transparentes, mientras que aquellos compuestos por hidrocarburos nafténicos tienen un tono amarillo claro a amarillo verdoso, y los aceites compuestos por hidrocarburos aromáticos presentan colores que van desde el amarillo rojizo (naranja) hasta el marrón oscuro.
- **Rigidez dieléctrica:** Para Alex & Petter (2019), la rigidez dieléctrica representa el voltaje mínimo necesario para que se produzca un arco eléctrico entre dos electrodos metálicos, lo cual indica la capacidad del aceite para resistir tensiones eléctricas sin experimentar fallas.
- **Presencia de agua, carbón u otros contaminantes:** Según Lenin Aníbal (2019), la presencia de agua, carbón u otros contaminantes en el aceite puede reducir su resistencia y rigidez dieléctricas. Por lo tanto, la determinación de la rigidez

dieléctrica es útil para evaluar si el aceite está contaminado, ya que una alta resistencia dieléctrica indica la ausencia de contaminantes.

2.14. Impacto en la Industria Eléctrica

La mejora de los procesos de tratamiento del aceite dieléctrico ofrece una amplia gama de ventajas para la industria eléctrica. Según Tibanlombo et al. (2020), además de disminuir los costos operativos, contribuye a fortalecer la confiabilidad de la red eléctrica. Esto, a su vez, tiene un impacto positivo en la sociedad al garantizar un suministro eléctrico más estable y fiable.

La sostenibilidad y la eficiencia energética, como señala Pérez Galided (2020), son fundamentales en esta optimización ya que, al reducir el consumo de energía y recursos, se alinea con los objetivos de conservación de recursos y disminución de emisiones de carbono. Esto es especialmente relevante en el contexto actual de preocupación por el cambio climático.

A pesar de las ventajas inherentes a la disposición final del aceite dieléctrico en equipos eléctricos, es crucial reconocer las desventajas asociadas con esta configuración. En ciertos escenarios, la colocación inadecuada del aceite puede incrementar la susceptibilidad a factores externos, tales como la contaminación ambiental o la exposición a condiciones climáticas extremas.

Adicionalmente, la disposición final del aceite puede conllevar un aumento en los costos de construcción y mantenimiento, dado que se demanda un diseño más elaborado y la implementación de medidas de seguridad adicionales. En última instancia, la elección de la disposición final del aceite dieléctrico requiere una evaluación minuciosa de sus aspectos positivos y negativos, con el objetivo de asegurar un rendimiento óptimo y la operación segura de los equipos eléctricos.

2.15. NORMA ASTM D-3487

Según Alex & Petter (2019) el propósito de esta Norma Técnica colombiana radica en establecer los atributos y requisitos técnicos que deben cumplir los aceites dieléctricos, tanto aislantes como refrigerantes, así como los ensayos a los que deben someterse. Esta norma se seleccionó para nuestra investigación debido a su exhaustividad. Los aceites

dieléctricos son utilizados en transformadores e interruptores, así como en equipos eléctricos similares como reguladores, seccionadores y dispositivos de maniobra. Es importante señalar que esta norma no aborda los aceites de alta viscosidad ni aquellos utilizados en cables o condensadores, ni los empleados con propósitos especiales de impregnación.

2.16. Color: Colorimetría Método astm-d-1500

El método de Colorimetría ASTM-D-1500, según Alex & Petter (2019), abarca la determinación visual del color de una amplia variedad de productos del petróleo, incluyendo aceites lubricantes, de calefacción, de combustible diésel y cera de petróleo.

2.17. Rigidez dieléctrica: método ASTM D877- procedimiento A

Según Alex & Petter (2019) La Rigidez dieléctrica se evalúa mediante el método ASTM D877, procedimiento A, el cual determina el voltaje de ruptura de líquidos donde cualquier producto insoluble de ruptura se precipita fácilmente durante el intervalo entre las pruebas de falla repetidas requeridas.

2.18. Contenido de humedad: Contenido de Agua ASTM-D1533

El contenido de humedad se determina utilizando el método ASTM-D1533, que describe la cantidad de agua presente en aceites mediante titulación coulométrica Karl Fischer, aplicable a aceites con concentraciones de agua superiores a 2 mg/kg y una viscosidad menor que 100 mm²/s a 40 °C.

2.19. Número Acido

El Número Ácido se evalúa mediante ASTM D974, que mide los constituyentes ácidos utilizando un cambio de color para indicar la inflexión. La muestra se disuelve en una solución específica y se titula con KOH mientras se controla el color.

2.20. Tensión interfacial

Según Alex & Petter (2019) la Tensión interfacial se evalúa según el estándar ASTM D971, que mide la tensión interfacial de los fluidos aislantes contra el agua por el método del anillo.

2.21. Densidad relativa

Según Alex & Petter (2019) la densidad relativa se determina mediante un procedimiento que emplea un hidrómetro de vidrio para medir la densidad relativa o la gravedad API de diversos líquidos, incluyendo petróleo crudo, productos derivados del petróleo, mezclas de petróleo y productos no petrolíferos líquidos con una presión de vapor Reid de 101.325 kPa o menos. Se destaca la importancia de registrar las lecturas del densímetro obtenidas en el laboratorio antes de realizar cualquier cálculo, aplicando los cálculos prescritos en la sección correspondiente.

2.22. Que es índice de calidad

Según Rolando et al. (2023) el índice de calidad del aceite dieléctrico constituye una medida de la habilidad del aceite para resistir la descomposición y conservar sus características a lo largo del tiempo, especialmente cuando se desempeña como aislante en equipos eléctricos, como los transformadores, este indicador es examinado a través de pruebas específicas que demuestran la capacidad del aceite para resistir la oxidación y otros procesos de deterioro. Cuanto más elevado sea el índice de calidad, mejor será la capacidad del aceite para que se quede con sus propiedades dieléctricas y aumentar su vida útil durante su uso en servicio.

Formula de índice de calidad:

IC= Tensión Interfacial/Acidez

CAPITULO III

3. METODOLOGIA

En el siguiente apartado se hablará del proceso a realizar sobre el filtro, cada fase del proceso, desde la elección de los materiales idóneos hasta la aplicación de métodos de manufactura especializados, es esencial para garantizar la eficacia y calidad del filtro. Las técnicas involucradas van desde la precisa selección y ensamblaje de componentes hasta la realización de pruebas exhaustivas para evaluar su funcionamiento y rendimiento.

3.1. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.1. Normativa Para Utilizar

Como se mencionó previamente, el estándar que regula nuestros procedimientos es una normativa de alcance internacional, específicamente la Norma ASTM D-3487, la cual establece las pautas para la evaluación de los aceites aislantes utilizados en transformadores. En el cuadro subsiguiente, se presentan los criterios que los aceites aislantes deben cumplir para su uso sin provocar daños en el transformador, así como los métodos de ensayo correspondientes para su verificación.

Tabla 2.- Requisitos que deben cumplir los aceites aislantes.

N°	CARACTERÍSTICAS	VALORES LÍMITES INHIBIDO		MÉTODO DE ENSAYO
		TIPO 1	TIPO 2	
FÍSICAS				
1	Aspecto visual	Claro y brillante	Claro y brillante	ASTM D 1524
2	Color	0,5 máx.	0,5 máx.	ASTM D 1500
3	Punto de anilina, °C	80 °C máx.	80 °C máx.	ASTM D 611
4	Punto de inflamación, °C	145 mín.	145 mín.	ASTM D 92
5	Punto de fluidez, °C	-30 máx.	-30 máx.	ASTM D 97
6	Tensión interfacial, a 25°C dinas/cm (1)	40 mín.	40 mín.	ASTM D 971
7	Gravedad específica, 15°C/15°C	0,865 - 0,910	0,865 - 0,910	ASTM D 1298
8	Viscosidad	12 máx.	12 máx.	ASTM D 445
	Viscosidad cinemática, a 40 °C, cst	76 máx.	76 máx.	ASTM D 2161
	0 °C	3 máx.	3 máx.	
QUÍMICAS				
9	Azufre corrosivo	No corrosivo	No corrosivo	ASTM D 1275
10	Contenido de agua, partes por millón (2)	15 máx.	15 máx.	ASTM D 1533
11	Número de neutralización, expresado como el número de acidez total, mg KOH/g de aceite	0,015 máx.	0,015 máx.	ASTM D 974
12	Contenido de inhibidor de oxidación, máximo, % en peso.	0,08	0,30	ASTM D 2668
13	Estabilidad a la oxidación acelerada: Ensayo Iodo - ácido.			ASTM D 2440
	72 h: % de Iodo por peso, máximo. Número de acidez total, mg KOH/g peso de aceite.	0,15 0,50	0,15 0,50	
	164 h: % de Iodo por peso, máximo. Número de acidez total, mg KOH/g peso de aceite.	0,30 0,60	0,20 0,40	
14	Prueba con bomba rotativa, mínimo.	195	220	ASTM D 2112
15	Prueba de Bifenilos Policlorados (PCB's)	No detectable	No detectable	ASTM D 4059
16	Tensión de ruptura dieléctrica a 60 Hz, kV, a. Electrodo de disco 2,54 mm de separación.	30 mín.	30 mín.	ASTM D 877
	b. Electrodo semiesférico V.D.E., 1.02 de separación.	28,2 mín.	28,2 mín.	ASTM D 1816
	Factor de potencia máximo a 60 Hz			
17	% a 25 °C	0,05 máx.	0,05 máx.	ASTM D 924
	% a 100°C	0,30 máx.	0,30 máx.	
18 *	Gasificación bajo esfuerzo eléctrico $\mu\text{L}/\text{min}$.	Negativo	Negativo	ASTM D 2300 (Procedimiento B)
19 *	Tensión de ruptura de impulso a 25 °C, kV, (Electrodo punta - esfera)	145 mín.	145 mín.	ASTM D 3300

Especificaciones Típicas

	Método ASTM	Mínimo	Máximo	Típico
Punto de Anilina	D611	63 °C (145 °F)	84 °C (183 °F)	75.8 °C (168 °F)
Color	D1500		0.5	L0.5
Punto de Inflamación, COC	D92	145 °C (293 °F)		148 °C (298 °F)
Tensión Interfacial a 25 °C, Mínima, dinas/cm	D971	40		42
Punto de Fluidez, máximo	D97		-45 °C (-50 °F)	-62 °C (-80 °F)
Densidad a 15 °C, kg/dm ³	D1298		0.9100	0.8938
Gravity, API a 60 °F	D4052			26.7
Viscosidad cSt a 100 °F	D2161			60.0
Viscosidad cSt a 100 °C	D445			2.56
Viscosidad cSt a 40 °C	D445		12.00	10.94
Viscosidad cSt a 0 °C	D445		76.00	75.90
Apariencia Visual	D1524	Claro Brillante	Claro Brillante	Claro Brillante
Tensión de Ruptura Dieléctrica (Rigidez Dieléctrica) a 60 Hz				
Electrodos planos, KV	D877	30		38
KV 1.02 MM Holgura	D1816	20		30
KV 2.03 MM Holgura	D1816	35		60
Rotura Dielectrica por impulso	D3300			
25C, Aguja a tierra				
25.4 MM holgura, KV	D3300	145		274
Factor de Potencia, 25 °C	D924		0.05%	0.002%
Factor de Potencia, 100 °C	D924		0.30%	0.073%
Contenido de inhibidor de oxidacion, Mass %	D2668	0.20%	0.30%	0.30%
Azufre Corrosivo	D1275	No Corrosivo	No Corrosivo	No Corrosivo
Contenido de Agua, ppm máximo	D1533		35	17
Número Neutralizador, MG KOH/g	D974		0.03	0.014
Estabilidad a la Oxidación	D2440			
72 Hr. Lodo, Mass %			0.1	0.1
72 Hr. Acido N ^o ., MG KOH/G			0.3	0.1
164 Hr. Lodo, Mass %			0.2	0.1
164 Hr. Acido N ^o ., MG KOH/G			0.4	0.1
Estabilidad a la Oxidación, RBOT, min	D2112	195		480
PCB's		0	0	0

Fuente: ENEL. (2004). ESPECIFICACIÓN TÉCNICA ACEITE DIELECTRICO. Norma

<https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/español/2-1-6-normas-tecnicas/especificaciones-tecnicas-para-materiales-y-equipos-de-media-tension/ET-021.pdf>

3.1.2. Consultas técnicas sobre aceites aislantes

Se llevó a cabo un análisis detenido y discusión acerca de los aceites aislantes, considerando su composición y métodos de tratamiento o eliminación, se evaluó desde diversas perspectivas y experiencias el alcance que se busca alcanzar con la optimización, buscando comprender los resultados esperados de la investigación y su implementación.

Figura 7.- Consultoría



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Se sostuvo una conversación y se solicitó la opinión de un especialista en ingeniería automotriz e ingeniero eléctrico, quien nos comentó la relación que existe con la estructura del aceite aislante y su procedimiento de tratamiento, proporcionando una perspectiva más amplia en diversas áreas sobre cómo recuperar y prevenir la pérdida completa del aceite aislante.

Figura 8.- Asesoramiento de un especialista sobre los aceites dieléctricos en los transformadores.



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Se mantuvo una capacitación breve con el especialista acerca de la gestión de los aceites aislantes y transformadores, así como su examen y supervisión con el propósito de prevenir y gestionar la descomposición adecuada de los mismos. Este proceso se encuentra influenciado por una serie de variables, como se ha detallado previamente.

3.1.3. Características técnicas de la elaboración del filtro

Con la finalidad de mejorar la eficiencia del tratamiento del aceite dieléctrico mediante el proceso de termovacío, se planteó la creación de un filtro para la fase final del tratamiento. El propósito no solo consiste en eliminar la humedad del aceite dieléctrico de los transformadores, sino también en restaurar sus propiedades, como el color, la rigidez dieléctrica, la acidez, la tensión interfacial y la densidad relativa.

Para el desarrollo del presente proyecto de titulación que corresponde a la elaboración de un filtro para el tratamiento del aceite dieléctrico y el equipo de termovacío donde se realizaron las pruebas, se consideró las siguientes características técnicas que se detallan a continuación:

Se utilizó un programa virtual denominado AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2023 donde se ingresaron ciertas variables técnicas como diámetros internos, externo, ubicación de las mangueras de entrada y salida del aceite, y se

realizaron los cálculos de ingeniería donde se obtuvieron las dimensiones del equipo a ser construido.

3.1.4. Características y detalles del proceso de termovaciación para el tratamiento de aceites aislantes.

En este apartado se va a explicar los equipos y el funcionamiento de la máquina de tratamiento de aceites aislante por proceso de termovaciación. El proceso de tratamiento del aceite aislante por el procedimiento de termovaciación se basa en tratar el aceite quitándole la humedad y partículas de agua que se han ido generando con el paso del tiempo, trabajo del transformador, temperatura y condiciones ambientales que se ve afectado el transformador.

Esta máquina de pequeña escala cuenta con diferentes equipos y bombas para tener una presión y fluidez en el tratamiento del aceite dando esto un sistema cerrado de entrada y salida, en el que el aceite entra por las mangueras y bombas y con esa misma presión es expulsada ya sin partículas de humedad y recuperando una parte de sus propiedades de aislamiento.

Para el proceso de la máquina de termovaciación cuenta con dos mangueras una de entrada y otra de salida que se encargara de la circulación y entrada del aceite contaminado y salida del aceite tratado, para la bomba de vacío cuenta con dos bombas, una bomba principal de vacío y una secundaria, cuenta con un filtro de pre entrada luego pasa al calentador donde será expuesto a unas temperaturas de más de 700 grados no pasando de 1000 ya que con esas temperaturas se dañarían las propiedades aislantes del aceite, una vez el aceite este en la temperaturas óptima sale por un filtro de salida y para la entrada de la cámara de termovaciación se lo lleva a cabo por una bomba de succión donde el aceite entra a la cámara de termovaciación y por esta misma sale el aceite tratado hacia el transformador o a un recipiente para su traslado. Cabe recalcar que este proceso lleva su tablero de control donde se opera, prende o apaga cada bomba del circuito y con cada cámara con un medidor de presión de líquidos para monitorear el circuito y con su banco de resistencias, un dato importante es que esta caja de control tiene conectado un termocupla que está conectada al banco donde si la temperatura llega a los 50 o 55 grados se apaga solo y mantenido el banco de resistencias evitando que se sobrecaliente la máquina y dando un balance de temperaturas.

Figura 9.- Características específicas de la máquina de termovació.



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Descripción exhaustiva proporcionada por el ingeniero acerca del funcionamiento de la máquina de termovació.

Figura 10.- Motores destinados a la operación de la bomba de vacío.



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Bombas principales y secundarias destinadas a las bombas de vacío

Figura 11.- Filtro de Pre-entrada



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Mangueras de entrada y salida del aceite y filtro de pre-entrada que da acceso al calentador.

Figura 12.- Cámara de calentamiento



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

La finalidad de la cámara de calentamiento es elevar la temperatura de las partículas de agua presentes en el aceite con el propósito de inducir su evaporación. Las partículas del agua en el aceite para su evaporación.

Figura 13.- Filtro de salida



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

El sistema de filtración ubicado en la salida de la cámara de calentamiento, a su vez, dirige hacia la cámara de vacío.

Figura 14.- Bomba de succión



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Bombeo de succión que facilita la introducción de aceite en la cámara de vacío.

Figura 15.- Cámara de termovació



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Cámara de vacío destinado a retener la humedad previamente extraída del calentador, permitiendo la liberación del aceite tratado.

Figura 16.- Panel de control



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Panel de Gestión equipado con indicadores de presión de los líquidos en el proceso, incluyendo una termocupla para la medición y regulación de la temperatura del calentador, evitando así el sobrecalentamiento de las resistencias.

3.1.5. Método de toma de muestra

La práctica de tomar muestras de líquidos aislantes eléctricos se lleva a cabo siguiendo las directrices establecidas en la normativa ASTM D923-07, y los resultados obtenidos se evalúan conforme a las normas IEEE C57.106-2015 y IEEE 104-2008. Este procedimiento se realiza con el propósito de recabar toda la información necesaria y determinar la acción o el procedimiento de mantenimiento específico a seguir en cada caso, con el objetivo de prevenir, minimizar o eliminar los riesgos eléctricos y gestionar adecuadamente la vida útil de los transformadores.

El procedimiento para la toma de muestras de aceite implica una limpieza del área de trabajo para evitar la presencia de polvo u otros contaminantes. Posteriormente, se coloca una manguera para drenar el aceite en un recipiente de vidrio o plástico de color ámbar, con una capacidad máxima de 1 litro, utilizando las precauciones correspondientes para evitar accidentes hacia la persona que está tomando las muestras.

CAPITULO IV

4.1. Características y parámetros de la muestra del aceite dieléctrico antes del tratamiento por termovació y filtrado

Antes de llevar a cabo la experimentación del aceite dieléctrico mediante el proceso final de termovació y filtrado, se realizó un análisis de los datos del aceite dieléctrico que se empleará en el tratamiento. Esto se hizo para examinar sus características y calidad iniciales y asegurarse de que la experimentación que llevará a cabo nuestro filtro no solo restablezca la humedad del aceite dieléctrico, sino también otros parámetros en los que nos enfocaremos antes y después del tratamiento. El objetivo es evaluar los resultados de nuestro experimento.

Nos centramos en varios aspectos para evaluar la calidad del aceite dieléctrico, incluyendo la cantidad agua en el aceite, la tensión interfacial, la acidez y el color.

El aceite que hemos obtenido presenta los siguientes parámetros de calidad característicos de un aceite desgastado, aunque aún es susceptible de ser tratado para su restauración. Nos hemos centrado en cuatro de estos parámetros que hemos logrado mejorar mediante este experimento:

El agua en el aceite se encuentra en un nivel de 8 partes por millón (ppm). El objetivo es quitar toda la cantidad posible de agua mediante el proceso de termovació, el cual extraerá la humedad del aceite que esté concentrada en él.

Los datos base de la tensión interfacial (mN/m) indican un valor de 29.1 mN/m, que se considera muy bajo según los estándares de calidad. El objetivo del experimento es alcanzar una tensión interfacial de 32.5 mN/m.

Los datos iniciales revelaron una acidez de 0.02 (mg KOH/g) que se traduce en miligramos de hidróxido de potasio por gramo. Dado que estos valores están por encima de nuestros objetivos, se dará especial atención a este parámetro, al igual que a la tensión interfacial, con el fin de reducirlo y alcanzar los niveles deseados.

Inicialmente, el color del aceite mostraba signos de degradación y uso, además de presentar partículas de lodo y residuos. El objetivo del proceso de termovaciación y filtrado aplicado fue lograr un tono más claro para el aceite.

Tabla 3.- Datos iniciales del aceite dieléctrico degradado

Valor	Parámetro	Método Prueba
29.1	TENSIÓN INTERFACIAL	ASTM D971 (2020)
0.02	NÚMERO ÁCIDO	ASTM D974 (2022)
<2.5	COLOR	ASTM D1500-12 (2017)
8	CONTENIDO DE AGUA	ASTM D1533 (2020)
0.9643	DENSIDAD RELATIVA	(15°C/15°C) ASTM D1298-12b (2017)
26	RIGIDEZ DIELECTRICA	ASTM D877/D877M PROCEDIMIENTO A (2019)

Fuente: Morgan Schaffer laboratorio acreditado (2024)

Tabla de la calidad del aceite dieléctrico antes del tratamiento y en los parámetros en que nos vamos a concentrar en mejorar con la propuesta del filtro diseñado, y construido por los estudiantes responsables de la presente tesis.

4.2. Datos del proceso de creación del recipiente filtro

La circunferencia de 90 cm y una altura de 17,5 cm le otorgan una forma cilíndrica que proporciona una capacidad de filtrado considerable, ideal para su función de purificación del aceite dieléctrico.

El filtro, con un diámetro de 28 cm, cuenta con dos agujeros para la entrada de tierra filtrante, cada uno con un diámetro interno de 5 cm. Esta disposición permite una adecuada circulación del aceite dieléctrico a través del medio filtrante, asegurando un proceso eficiente de purificación.

El filtro se encuentra contenido dentro de un envase con una altura de 45 cm, proporcionando un amplio espacio para el filtrado del aceite dieléctrico. Este envase está fabricado con planchas de hierro negro de 3 mm, lo que le confiere resistencia y durabilidad.

La tapa superior del envase, con un diámetro de 45 cm y una base de 35.5 cm de diámetro, está hecha de metal de hierro negro de 6 mm, garantizando un cierre hermético y seguro del filtro. Además, la tapa cuenta con un medidor de presión de 100 psi, lo que permite monitorear la presión interna del filtro durante el proceso de filtrado.

El filtro cuenta con una entrada de aceite dieléctrico por presión en la base, lo que facilita el proceso de filtrado al garantizar un flujo constante de aceite a través del medio filtrante. Además, dispone de una salida en la parte del costado del envase para la extracción del aceite filtrado, lo que permite una manipulación sencilla y eficiente del aceite purificado.

Por último, el filtro está equipado con patas de 24 cm que elevan el envase, proporcionando estabilidad y facilitando el acceso para la manipulación del filtro y la extracción del aceite filtrado, lo que contribuye a su operatividad y facilidad de uso.

En la parte superior se realizó seis perforaciones en la tapa para colocar pernos de 1 pulgada que sirvan de seguro para cerrar la tapa y que no escape por ahí la presión del aceite dieléctrico en el momento del filtrado. Adicional se colocó un medidor de presión de líquidos de 100 psi (100 libras por pulgada cuadrada). En la parte inferior se realizó una perforación central de 1 pulgada para el ingreso del aceite dieléctrico en mal estado, sellando la parte superior de la tubería para que salga el aceite solo por la parte lateral de la tubería la cual se la perforo con 30 perforaciones.

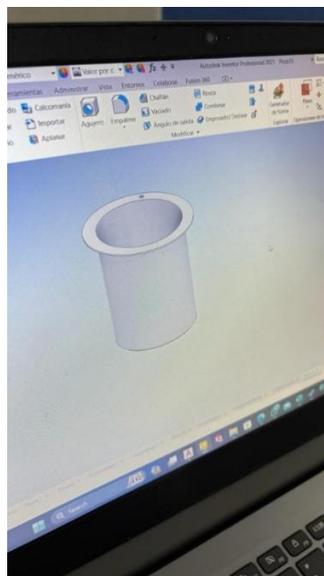
Al finalizar y para sujetar el recipiente se soldaron 4 patas de metal de 25 centímetros de longitud, lo que además sirve para poder elevar el recipiente y poder ajustar la manguera a la tubería de ingreso del aceite en mal estado. La soldadura que se utilizó fue soldadura de cordón de alambre conocido en los talleres industriales como soldadura tipo MIG. La soldadura MIG, dependiendo del gas que se inyecte es una soldadura a gas y arco metálico, es una soldadura por arco bajo gas protector. Al final para proteger el recipiente construido se lo pinto con pintura antioxidante color negro.

Figura 17.- Filtro de Tierra Filtrante.



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Figura 18.- Diseño digital para el filtro



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Se empleó un programa de AutoDesk en la elaboración del diseño del contenedor destinado a almacenar los filtros que contienen la tierra filtrante.

Figura 19.- Interior del recipiente filtro



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

El interior del contenedor adopta una configuración circular diseñada para resguardar los filtros.

Figura 20.- Se contacto a un mecánico, experto en tipos de soldadura debido a que el equipo iba a ser sometido a altas presiones.



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Se determinó la necesidad de consultar a un especialista en soldadura para llevar a cabo el sellado y ajuste preciso de las piezas del contenedor, garantizando así su hermeticidad y capacidad para soportar las presiones a las que será sometido.

Figura 21.- Tapa con seguro de sello tipo grifo



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Se realizó el reajuste utilizando llaves de tipo grifo con el fin de sellar nuevamente el recipiente, asegurando que el aceite no se escape por la tapa, sino que sea dirigido mediante la presión generada por la bomba hacia las mangueras.

Figura 22.- Instrumento para la medición de la presión de fluidos



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Asimismo, se incluyó un dispositivo de medición de la presión de líquidos, esencial para conocer la condición de los fluidos dentro del contenedor y anticipar posibles riesgos de desbordamiento.

Figura 23.- Resguardo interno destinado a los filtros



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto

Figura 24. - Introducción de los filtros con tierra filtrante en el contenedor



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

El medio filtrante que contiene tierra sílice gel es introducido en el recipiente y posteriormente se cierran herméticamente utilizando la llave de seguridad.

El filtro cilíndrico, con una altura de 17,5 cm y bases de aluminio de 28 cm de diámetro, exhibe un diseño sólido y práctico. La disposición estratégica de sus tres orificios posibilita una circulación fluida. El orificio central de 5 cm atraviesa el filtro en su totalidad, facilitando su montaje. Los dos orificios restantes, también de 5 cm, localizados en las bases, están destinados a la entrada de la sílice gel, garantizando así una filtración precisa y eficaz, y en el contorno del cilindro tiene un material filtrante de color café para que solo pase el aceite.

Figura 25. - Aplicación de una capa de pintura anticorrosiva.



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Figura 26. - Verificación de las mediciones del filtro



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Figura 27.- Presentación final del filtro



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

4.3. Preparación de los filtros con la tierra filtrante

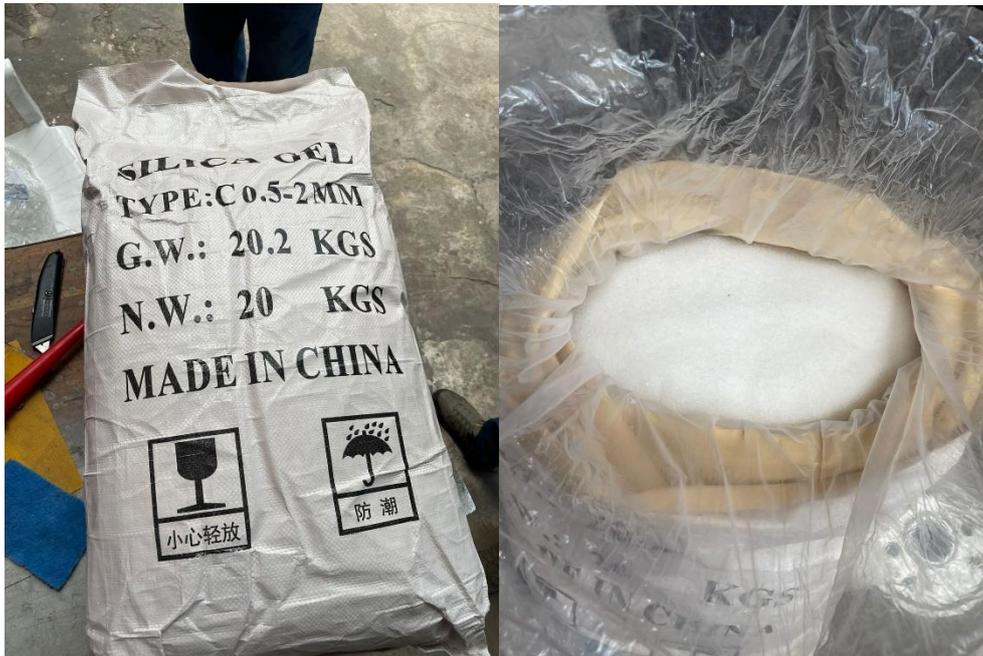
Se procedió con la realización del experimento, iniciando con la sustitución del material filtrante previamente utilizado por la sílice gel, un material derivado de tierras filtrantes. Se realizó esta modificación con la finalidad de analizar la eficacia de la sílice gel en la filtración del aceite.

Figura 28.- Retiro de Tierra Filtrante usada



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Figura 29.- Sílice Gel



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

El material empleado en el experimento consiste en sílice gel, una sustancia terrosa con propiedades particulares, que exhibe un color blanco brillante y emana un olor

característico similar al del cloro. Es fundamental manipularlo con precaución y evitar su exposición a la humedad.

Figura 30.- Introducción de la sílice gel en los filtros



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Se procedió a introducir la sílice gel en los filtros mediante un embudo y se lo fue agregando hasta llenar por completo los dos filtros, se debe tener precaución al ingresar el material.

4.3.1. Preparación del sello de caucho para la tapa del filtro

Dado que estaremos trabajando con fluidos sometidos a presiones generadas por las potencias suministradas por los motores de la máquina de vacío térmico, se llevó a cabo la creación y ajuste de un sello de goma que separara la tapa del recipiente del filtro, con el fin de prevenir cualquier fuga o pérdida de aceite durante el inicio del experimento.

Figura 31.- Medidas y ajustes al tapón de goma



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Utilizando una lámina de caucho y siguiendo las medidas previamente registradas y verificadas, se realizó un corte circular con un compás para obtener el tapón de sellado del filtro.

Figura 32.- Culminación del sellado



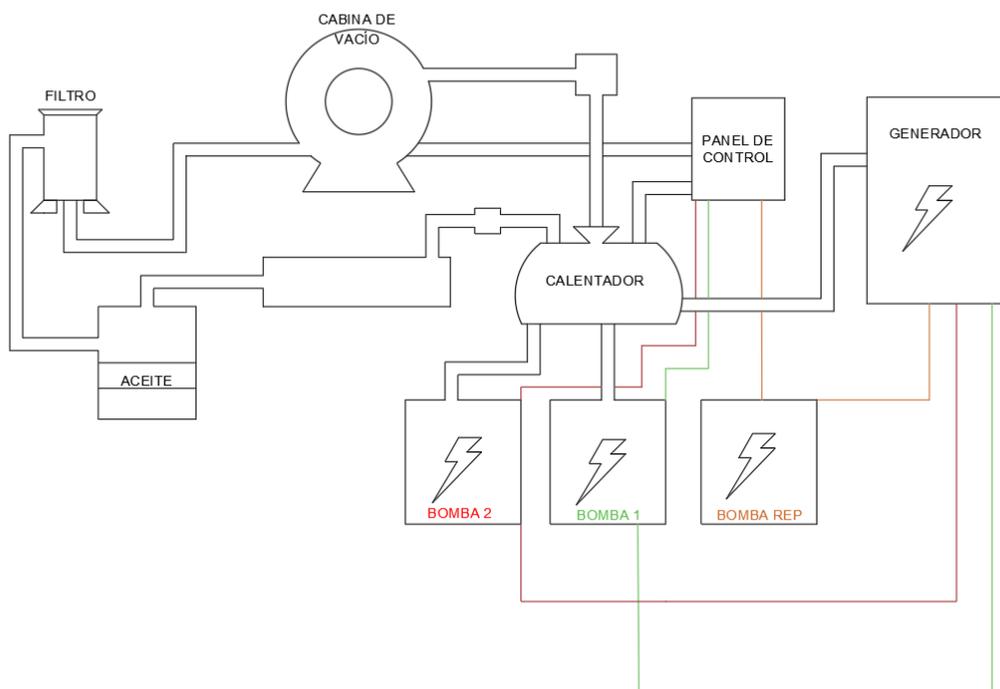
Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Se llevó a cabo la marcación de las aperturas destinadas a los tornillos del filtro, seguido de su corte. Una vez completado este proceso y cerrado el filtro de manera adecuada, se procedió al traslado de este para dar inicio al experimento.

4.4. Proceso de filtrado

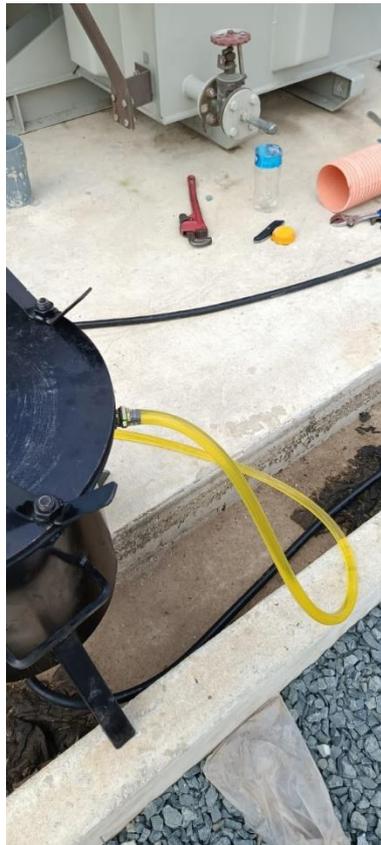
La estrategia empleada para establecer la vinculación entre el filtro y la máquina de termovaciación se inicia con la localización del conducto de ingreso del filtro en su base. Este conducto es conectado de manera firme y segura a la máquina de termovaciación, asegurando así un flujo adecuado de materiales entre ambos elementos. Esta conexión adquiere una importancia para el funcionamiento íntegro del sistema, asegurando que el material a ser filtrado pueda ser introducido eficientemente en el proceso de termovaciación. En la figura 33 exhibe el diagrama de flujo que explican las conexiones implementadas en la construcción del circuito.

Figura 33.- Diagrama de flujo del circuito



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Figura 34.- Entrada del aceite al filtro



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

El conducto de salida del filtro se une a una manguera sumergida en un recipiente que contiene aceite dieléctrico. Este paso se considera primordial para garantizar la continuidad del proceso, dado que el aceite dieléctrico actúa como un medio altamente eficaz para la transferencia de calor, facilitando el mantenimiento de una temperatura constante durante la fase de filtrado. Se realiza esta conexión entre el filtro y el recipiente de aceite dieléctrico con sumo cuidado para evitar cualquier fuga o interrupción en el flujo.

Figura 35.- Salida del aceite al galón



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Una vez que la manguera se encuentra correctamente conectada al recipiente de aceite dieléctrico, se instala una segunda manguera en la entrada de dicho recipiente. Esta segunda manguera tiene la función de absorber el aceite dieléctrico hacia la máquina de termovació, completando de este modo el circuito. Es de suma importancia verificar que esta conexión esté perfectamente sellada con el fin de evitar cualquier pérdida de aceite y garantizar un funcionamiento fluido del sistema.

Figura 36.- Cierre de circuito



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Una vez realizadas todas las conexiones pertinentes, se cerró el circuito, lo que permite que el material a ser filtrado fluya de manera ininterrumpida a través del filtro y del aceite dieléctrico hacia la máquina de termovacío. Este proceso resulta en una filtración precisa y eficiente, lo que a su vez asegura la calidad y pureza del producto final obtenido. La correcta disposición y conexión de los componentes resultan fundamentales para obtener resultados óptimos en el proceso de termovacío.

Figura 37.- Circuito completo



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

El procedimiento experimental se inicia con la transferencia del aceite contenido en el depósito hacia la unidad de termovacío, con el propósito primordial de lograr una absorción efectiva del aceite dieléctrico para su ulterior procesamiento. Una vez en la unidad de termovacío, el aceite es sometido a un tratamiento térmico con el objetivo de eliminar la humedad residual presente en el líquido. Esta fase reviste una importancia crucial, ya que el proceso de eliminación de humedad es fundamental para mejorar la calidad del aceite y su desempeño en el sistema en cuestión.

Tras el tratamiento térmico, el aceite con una concentración reducida de humedad ingresa al filtro. En esta etapa, la aplicación de presión facilita el desplazamiento ascendente del aceite a través del gel de silicona alojado en el interior del filtro, donde tiene lugar la etapa de filtrado. Esta fase desempeña un papel importante en la eliminación de cualquier impureza presente en el aceite dieléctrico, garantizando así su pureza y calidad.

Una vez completado el proceso de filtrado, el aceite es devuelto al depósito para iniciar un nuevo ciclo. Este ciclo se repite durante tres días consecutivos, cada uno con una duración variable. En el primer día, el proceso se lleva a cabo durante un lapso de seis horas, comenzando al mediodía y finalizando a las 17H30. En el segundo día, la duración del proceso se extiende a once horas, desde las 08H00 hasta las 18H30. En el tercer día, debido a circunstancias climáticas adversas, el ciclo se reduce a dos horas, iniciando a las 13h00 y concluyendo a las 15h00.

Durante el tercer día, se registró una demora en el inicio del proceso debido a la lluvia, lo cual imposibilitó la realización del trabajo con la máquina de filtrado. A pesar de la presencia del operador desde las 8 de la mañana, el proceso no pudo dar inicio sino hasta que cesó la lluvia, ocurrido alrededor de las 11 de la mañana. Por consiguiente, el ciclo se realizó desde las 11 de la mañana hasta la 1 de la tarde, momento en el cual se reanudaron las actividades.

Este enfoque metodológico ha sido meticulosamente diseñado con el propósito de garantizar un tratamiento completo del aceite dieléctrico, adaptándose a diversas condiciones operativas y climáticas. La variación en la duración de los ciclos permite una gestión flexible del proceso, asegurando tanto la eficiencia del sistema como la calidad

del aceite tratado. La combinación de la absorción, el tratamiento térmico, el filtrado y el retorno al depósito se ha estructurado de manera sistemática con el fin de obtener resultados óptimos y consistentes a lo largo del tiempo.

4.4.1. Proceso de Filtrado y segundo día de recirculación.

Se continuó monitoreando el proceso de recirculación del aceite aislante con el objetivo de mejorar su filtración y lograr un cambio de color óptimo. Este proceso inició a las 08H30 de la mañana y concluyó a las 17H55.

Figura 38.- Segundo día de recirculación



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

El proceso de recirculación del aceite aislante se reanudó al día siguiente con el objetivo de mejorar los resultados en términos de su coloración.

Figura 39.- Cambio de la sílice gel de los filtros



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

La sílice gel utilizada fue retirada de los filtros, lo que reveló un notable cambio en su coloración, habiendo absorbido una gran cantidad del color del aceite, lo que resultó en un tono anaranjado. Posteriormente, se procedió a rellenar los filtros con sílice gel nueva para continuar con el proceso de circulación. Esta operación se llevó a cabo al mediodía, específicamente a las 12H50.

Figura 40.- Muestras del aceite tratado 08/02/2024



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

Al concluir la sesión de recirculación, que finalizó a las 17h30, se observaron los resultados obtenidos mediante el proceso de recirculación y filtrado llevado a cabo por la máquina de termovació y el filtro con sílice gel. Se notó una marcada diferencia en el color del aceite, que se presentaba más claro, limpio y menos desgastado.

4.4.2. Finalización del proceso de Recirculación y Filtrado

Se llevó a cabo una última sesión de recirculación y filtrado como parte del proceso final de nuestro experimento. Esto se realizó con el objetivo de otorgar al aceite un tratamiento final y permitir que la nueva sílice gel colocada pueda completar todo el proceso de filtración. Posteriormente, se enviaron las muestras al laboratorio acreditado para su análisis. El período dedicado a la experimentación solo se pudo hacer en 3 horas en el medio día. Esto se debió a las condiciones climáticas adversas, ya que el proceso debe llevarse a cabo en ausencia de lluvia y humedad, las cuales podrían afectar negativamente tanto el proceso de termovació y filtrado como el tratamiento del aceite.

Figura 41.- Ultimo proceso de recirculación y filtrado



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

En el último día de filtrado con sílice gel en un circuito cerrado, donde el aceite se recircula entre una cámara de vacío y un filtro experimental, se observa un aumento en el medidor de presión de los filtros. Este incremento indica que el sistema está operando correctamente y que no hay fugas, gracias a la implementación de herramientas de presión para ajustar la tapa del filtro y prevenir la pérdida de aceite.

Figura 42.- Resultados finales



Fuente: Arturo Clavijo y Victor Soto (2024)

El resultado del aceite al concluir el proceso de termovació y filtrado es un tono amarillo claro. Esto indica que la sílice gel ha cumplido su función al absorber gran parte del color degradado que presentaba inicialmente, como se pudo observar durante los monitoreos continuos.

Figura 43.- Toma de muestras



Fuente: Arturo Clavijo y Víctor Soto (2024)

Las muestras se colocaron en recipientes de vidrio de color ámbar, los cuales habían sido previamente tratados y almacenados adecuadamente. Se extrajo una muestra simple del aceite dieléctrico utilizando una jeringa, la cual fue sellada herméticamente para evitar la entrada de humedad.

Figura 44.- Muestra recolectada



Fuente: Arturo Clavijo y Víctor Soto (2024)

Figura 45.- Aceite Dieléctrico antes del proceso



Fuente: Arturo Clavijo y Víctor Soto (2024)

Se extrajo una muestra del aceite dieléctrico y se colocó en un recipiente para evaluar su estado inicial. Se observó que el color inicial era un tono anaranjado, con algunas partículas suspendidas (trazas de metales, tierra, óxidos metálicos, etc.). El propósito del procedimiento consiste en purificar el aceite con el fin de mejorar su transparencia y pureza.

4.5. Análisis de datos

Los datos recopilados abarcan diversos parámetros relevantes antes y después del filtrado del aceite dieléctrico, incluyendo la tensión interfacial, la acidez, el color, la cantidad de agua en el aceite, la densidad relativa, la rigidez dieléctrica y un índice de calidad global.

Tabla 4.- Resultados del aceite

Análisis de laboratorio del aceite dieléctrico						
ENSAYOS	EQUIPO DE ENSAYOS	RESULTADOS	INCERTIDUMBRE	UNIDAD	CALIFICACIÓN	CRITERIOS DE LAS S.D. MYRES PARA LA DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD *
COLOR ASTM D1500-12 (2017)	CO-01	< 1,5	±0,5	Unidades de Color ASTM	AC	≤ 3,5
DENSIDAD RELATIVA (15°C/15°C) ASTM D1298-12b (2017)	DE-01 *DE-02 DE-03	0,8780	±0,0048	Adimensional-1	AC	0,840-0,910
NÚMERO ÁCIDO ASTM D974 (2022)	BU-01	0,02	±0,0077	mgKOH/g	AC	≤ 0,05
TENSIÓN INTERFACIAL ASTM D971 (2020)	TI-01	36,2	±0,4	mN/m	AC	≥ 28
RIGIDEZ DIELECTRICA ASTM D877/D877M PROCEDIMIENTO A (2019)	RD-01	40	±7	kV	AC	≥ 30
CONTENIDO DE AGUA ASTM D1533 (2020)	CH-01 *CH-02	22	±5 ±6	mg/kg (ppm)	AC	< 30

Fuente: Britransformadores S.A. (2024)

*Los criterios que se mencionan en la tabla 4 se encuentran en la tabla 5

A continuación, se detalla los parámetros donde se considera la declaración de conformidad según los criterios de la norma internacional ASTM D-3487. La declaración de conformidad se basa en la capacidad del aceite para cumplir con estos requisitos, garantizando así su idoneidad y seguridad en aplicaciones eléctricas de alta tensión.

Tabla 5.- Criterios de las s. D. Myres para la declaración de conformidad

CRITERIOS DE LAS S. D. MYRES PARA LA DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD				
REFERENCIA				
Aceite en uso			Aceite Nuevo	Parámetro
Aceptable (AC)	Cuestionable (CU)	Inaceptable (IN)		
≤ 3,5	N/A	> 3,5	< 0,5	COLOR ASTM D1500-12 (2017)
0,840-0,910	< 0,840	> 0,91	0,910 máx.	DENSIDAD RELATIVA (15°C/15°C) ASTM D1298-12b (2017)
≤ 0,05	> 0,05 ≤ 0,1	> 0,10	0,03 máx.	NÚMERO ÁCIDO ASTM D974 (2022)
≥ 28	< 28 ≥ 22	< 22	40 min	TENSIÓN INTERFACIAL ASTM D971 (2020)
≥ 30	< 30 ≥ 25	< 25	30 min	RIGIDEZ DIELECTRICA ASTM D877/D877M PROCEDIMIENTO A (2019)
< 30	≥ 30	> 35	35 máx.	CONTENIDO DE AGUA ASTM D1533 (2020)

Fuente: Britransformadores S.A. (2024)

4.5.1. Comparación de resultados

En esta sección, se procedió a exponer y realizar una comparación entre los parámetros del aceite recibido inicialmente y aquel sometido a nuestro experimento. Se describirán en detalle los parámetros discutidos con el ingeniero previo al proceso de tratamiento, a saber: color, acidez, tensión interfacial y contenido de agua. Se analizará el cambio provocado por el proceso de filtrado con sílice gel y se verificará la eficacia de este material en la restauración de los parámetros fundamentales que caracterizan a un aceite dieléctrico.

Se realizaron comparaciones entre las tablas de parámetros de calidad del aceite dieléctrico proporcionadas por el laboratorio acreditado Morgan Schaffer el 27 de octubre de 2022, que representan los aceites obtenidos antes del tratamiento, y los resultados finales obtenidos mediante el análisis fisicoquímico realizado por el laboratorio acreditado Britransformadores S.A. después del tratamiento llevado a cabo.

Tabla 6.- Comparación del aceite dieléctrico

Tabla de comparaciones calidad del aceite Dieléctrico							
Calidad del aceite 2022-10-27 Lab Morgan Schaffer ISO/IEC 17025			Aceite Nuevo	Análisis Físico – Químico del aceite tratado 2024-02-09 Britransformadores S.A.			Porcentaje de optimización
PARÁMETROS	VALOR	MÉTODO PRUEBA		PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDAD	
AGUA EN ACEITE (ppm)	8	D 1533-20	35 máx.	CONTENIDO DE AGUA ASTM D1533 (2020)	22	mg/kg (ppm)	40%
DENSIDAD RELATIVA	0.9643	(15°C/15°C) ASTM D1298-12b (2017)	0.91	DENSIDAD RELATIVA	0.878	Adimensional-1	9.5%
RIGIDEZ DIELECTRICA	26	ASTM D877/D877M PROCEDIMIENTO A (2019)	30	RIGIDEZ DIELECTRICA	40	kV	46.7%
TENSIÓN INTERFACIAL (mN/m)	29,1	D 971-20	40 min	TENSIÓN INTERFACIAL ASTM D971 (2020)	36,2	mN/m	17.8%
ACIDEZ (mgKOH/g)	0,02	D 974-14e2	0,03 máx.	NÚMERO ÁCIDO ASTM D974 (2022)	0,02	mgKOH/g	0%
COLOR	<2,5	D1500-12	< 0,5	COLOR ASTM D1500-12 (2017)	< 1,5	Unidades de Color ASTM	28.6%
INDICE DE CALIDAD	1455	TENSIÓN INTERFACIAL/ ACIDEZ	1500	TENSIÓN INTERFACIAL/ ACIDEZ	1800	Adimensional	23.7%

Fuente: Arturo Clavijo y Víctor Soto (2024)

Se observa un aumento en el contenido de agua entre los valores antes y después del tratamiento. Este incremento puede atribuirse, en parte, a las condiciones climáticas, especialmente a la humedad asociada con el clima lluvioso en el que se llevó a cabo el trabajo. Además, el material filtrante utilizado, la sílice gel, tiene la capacidad de liberar la humedad que ha absorbido cuando se expone al calor. Aunque este proceso pueda resultar en un aumento del contenido de agua, no genera una preocupación significativa, dado que esta humedad adicional puede ser eliminada mediante un proceso de termovaciación.

extendido. En términos de conformidad con los estándares establecidos, Se observó que los niveles de humedad se mantienen dentro de los límites permitidos, como se indicó en la tabla 4 de criterios.

Se lograron resultados altamente satisfactorios en el parámetro de Tensión interfacial. Este parámetro es crucial de cara a mantener las propiedades óptimas del aceite, ya que su disminución puede afectar su capacidad funcional. Es notable que, tras tres días de filtrado, este parámetro haya experimentado un aumento, lo cual se atribuye al proceso de filtrado con sílice gel. Además de su eficacia en la absorción del color, este material filtrante ha demostrado ser efectivo en la restauración de la Tensión interfacial, acercando los valores obtenidos a los de un aceite nuevo. Los valores de acidez se mantienen estables, aunque es posible aumentar este parámetro mediante un tratamiento adicional de termovació y filtrado prolongado. Este proceso ayudaría a controlar la acidez y a situarla en niveles similares a los de un aceite nuevo.

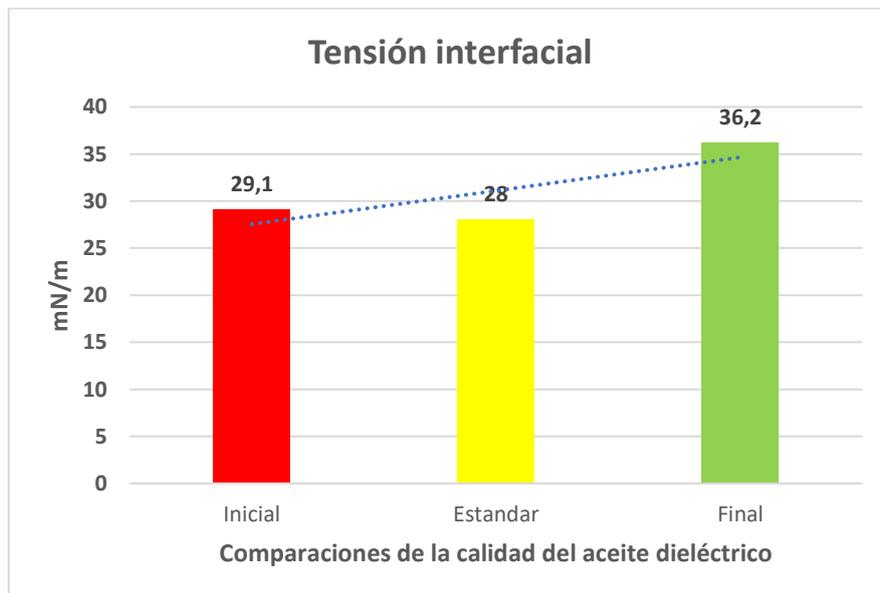
Los resultados obtenidos para el color, al igual que para la tensión interfacial, fueron óptimos. Se buscaba mejorar el color para que se asemejara al de un aceite claro y limpio. Estos resultados se lograron gracias al sistema de termovació y, especialmente, al material filtrante de sílice gel. La eficacia de este material en la absorción del color del aceite dieléctrico se pudo verificar mediante el cambio observado en la figura 37. Se evidenció la capacidad del material para absorber el color del aceite, dejándolo con un tono amarillo claro y valores aceptables, casi equivalentes a los de un aceite nuevo.

El análisis del porcentaje de optimización de los parámetros de calidad del aceite muestra una variedad de resultados que reflejan la efectividad del proceso de optimización. Se observa un aumento del 17.8% en la tensión interfacial, indicando una mejora sustancial en la capacidad del aceite dieléctrico para resistir la contaminación, lo que potencialmente se traduciría en una mayor resistencia y eficiencia de los transformadores. Por otra parte, se registran aumentos del 28.6% y 9.5% en el color y la densidad relativa respectivamente, señalando áreas potenciales de mejora en el proceso de optimización, sobre todo en color, ya que una reducción en el color podría ser indicativo de degradación del aceite, y un cambio negativo en la densidad relativa podría afectar su estabilidad y capacidad dieléctrica.

Por otro lado, el análisis resalta mejoras notables en la rigidez dieléctrica y en el índice de calidad, con aumentos del 46.7% y 23.7%, respectivamente. Estos resultados prometedores indican una mayor capacidad del aceite para resistir la conducción eléctrica y una mejora general en su calidad y desempeño. Además, el incremento del 40% en la reducción del contenido de agua en el aceite es un descubrimiento significativo, dado que la presencia de agua es un factor crítico que puede comprometer tanto la eficacia como la seguridad de los transformadores. En conjunto, estos hallazgos subrayan la complejidad del proceso de optimización y la importancia de un análisis detallado para comprender plenamente su impacto en la calidad y el rendimiento del aceite dieléctrico.

Inicialmente, se observa un incremento significativo en la tensión interfacial del aceite, pasando de 29.1 mN/m a 36.2 mN/m, superando el estándar mínimo de 28 mN/m, como se observa en la figura 46. Este aumento indica una mejora sustancial en la capacidad del aceite para resistir la formación de burbujas y mejorar la estabilidad del sistema eléctrico, lo cual es crucial para un funcionamiento óptimo de los equipos eléctricos.

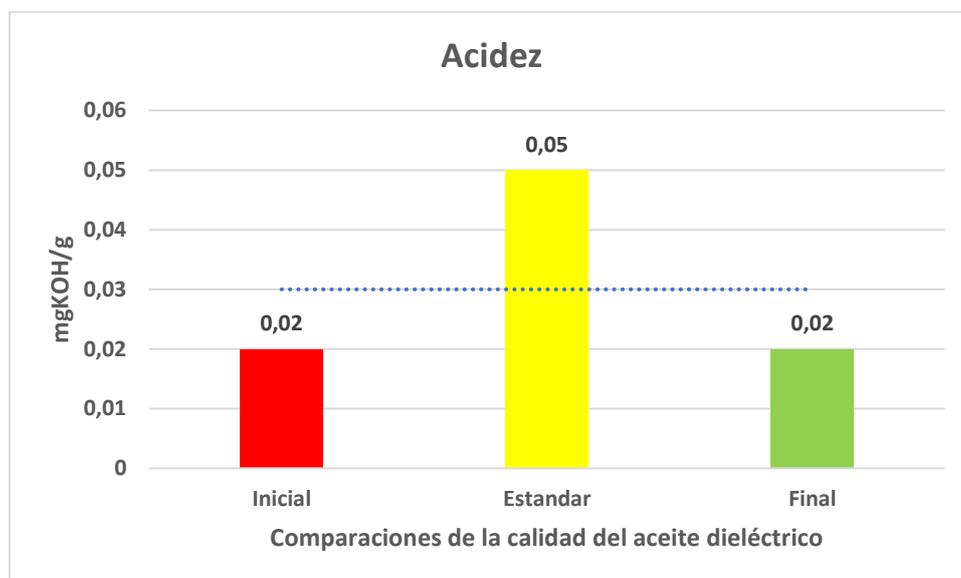
Figura 46.- Diagrama de barras de tensión interfacial



Fuente: Arturo Clavijo y Víctor Soto (2024)

Por otro lado, se constata que los valores de acidez del aceite permanecen estables en 0.02, cumpliendo con el estándar de ser igual o inferior a 0.05, como se observa en la figura 47. Esto sugiere que el proceso de filtrado no ha tenido un impacto significativo en este parámetro, lo que podría indicar que el aceite inicialmente en acidez estaba en buenas condiciones o que el proceso de filtrado no fue lo suficientemente efectivo para eliminar los compuestos ácidos presentes.

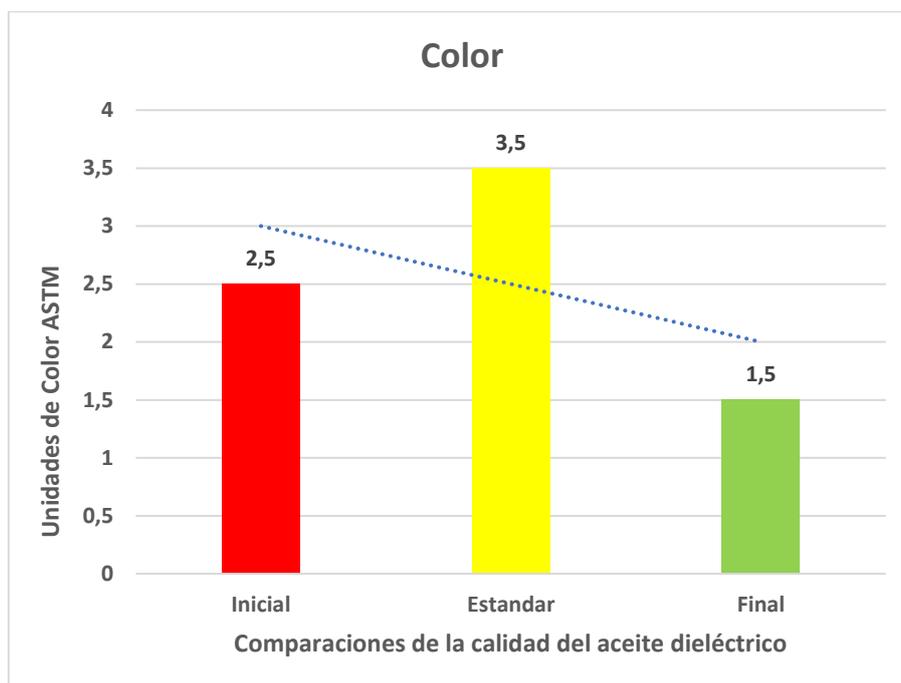
Figura 47.- Diagrama de barras de acidez



Fuente: Arturo Clavijo y Víctor Soto (2024)

En cuanto al color del aceite, se registra una notable disminución desde menos de 2.5 hasta menos de 1.5, como se observa en la figura 48, cumpliendo con el estándar de ser igual o inferior a 3.5. Esta reducción en la intensidad del color sugiere una disminución en la presencia de impurezas y materiales en descomposición en el aceite, lo que refleja la eficacia del proceso de filtrado para mejorar la calidad visual del aceite.

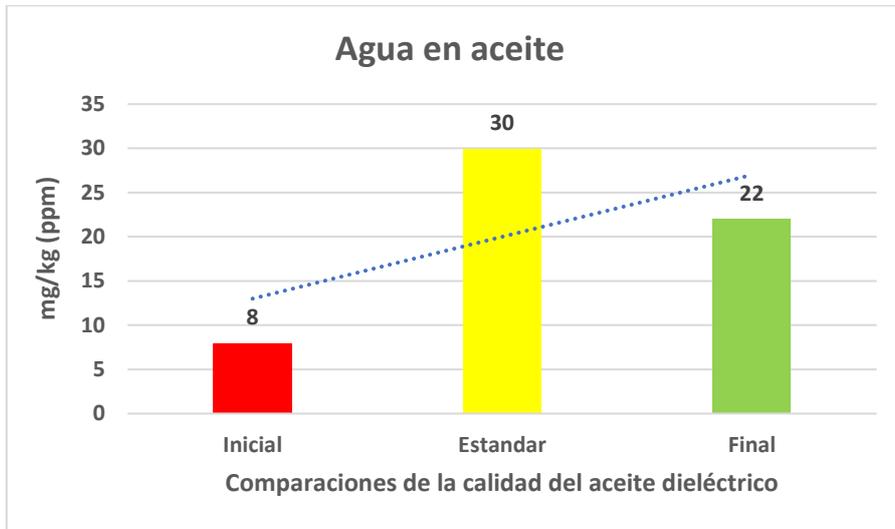
Figura 48.- Diagrama de barras del color



Fuente: Arturo Clavijo y Víctor Soto (2024)

Sin embargo, es importante destacar que la cantidad de agua en el aceite ha experimentado un aumento significativo, pasando de 8 ppm a 22 ppm, aunque aún se mantiene por debajo del estándar máximo de 30 ppm, como se observa en la figura 49. Este incremento podría atribuirse a la entrada de agua durante el día de lluvia, lo que subraya el impacto de las condiciones del entorno ambiental en la calidad del aceite incluso después de un proceso de filtrado adecuado.

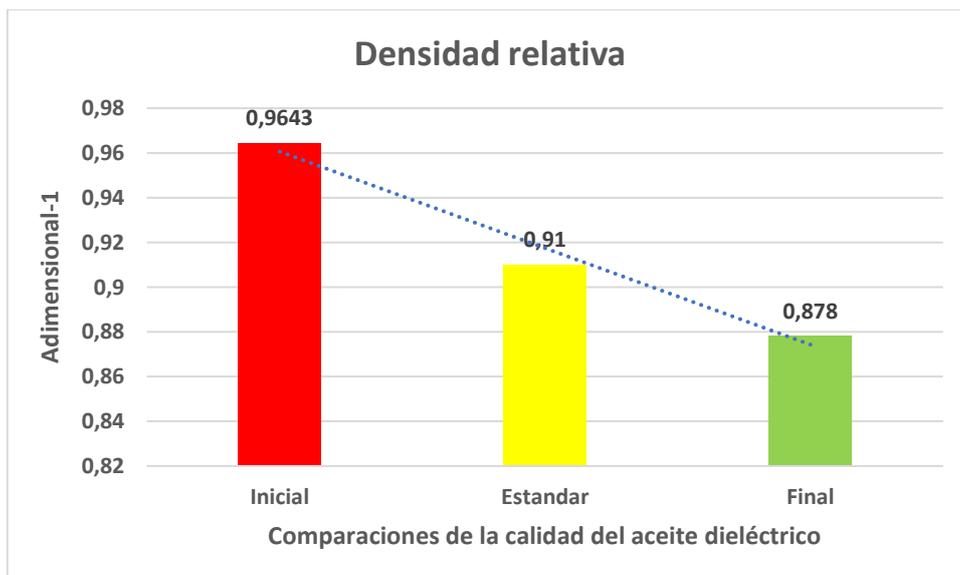
Figura 49.- Diagrama de barras de agua en aceite



Fuente: Arturo Clavijo y Víctor Soto (2024)

Además, se nota una significativa reducción en la densidad relativa del aceite, pasando de 0.9643 a 0.878, como se observa en la figura 50, aunque sigue dentro del rango estándar de 0.840-0.910. Esta reducción puede ser atribuida a la existencia de agua en el aceite y posibles cambios en su composición durante el proceso de filtrado.

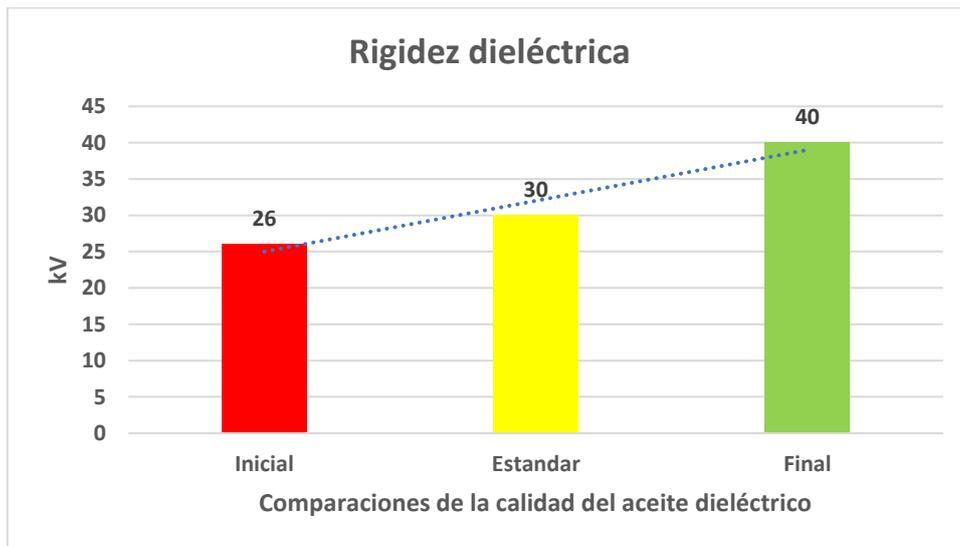
Figura 50.- Diagrama de barras de la densidad relativa



Fuente: Arturo Clavijo y Víctor Soto (2024)

Finalmente, la rigidez dieléctrica del aceite experimenta un aumento significativo, pasando de 26 kV/mm a 40 kV/mm, superando el estándar mínimo de 30 kV/mm, como se observa en la figura 51. Este incremento indica una mejora en la capacidad del aceite para resistir la ruptura dieléctrica y proporcionar un aislamiento efectivo en equipos eléctricos, lo cual es esencial para asegurar su operación segura y efectiva.

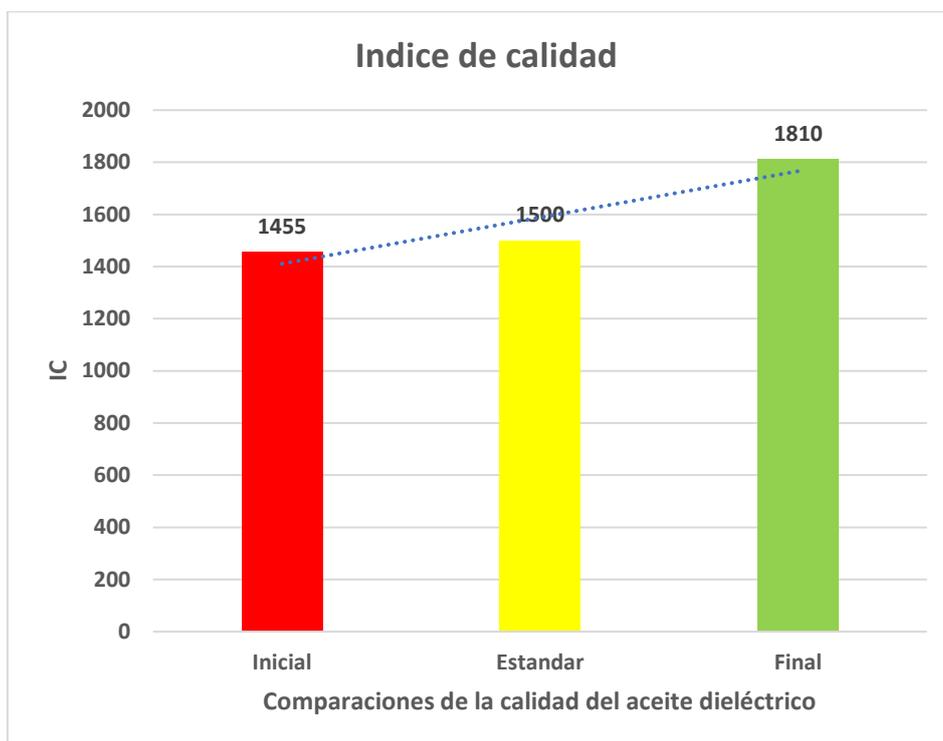
Figura 51.- Diagrama de barras de la rigidez dieléctrica



Fuente: Arturo Clavijo y Víctor Soto (2024)

El índice de calidad inicial del aceite dieléctrico se registró en 1455, y tras el proceso de filtrado, este valor aumentó a 1810, como se observa en la figura 52, superando el estándar establecido de 1500 este notable avance demuestra la eficacia del proceso de filtración en la mejora de la calidad del aceite, lo que implica una contribución positiva del filtro en la eliminación de impurezas y en el mejoramiento de las propiedades del aceite dieléctrico. Este resultado promete un funcionamiento más eficiente y seguro de los equipos eléctricos donde se emplee este aceite, subrayando la importancia del proceso de filtrado en la optimización de la calidad del aceite dieléctrico y, por ende, en la fiabilidad del sistema eléctrico.

Figura 52.- Diagrama de barras del índice de calidad



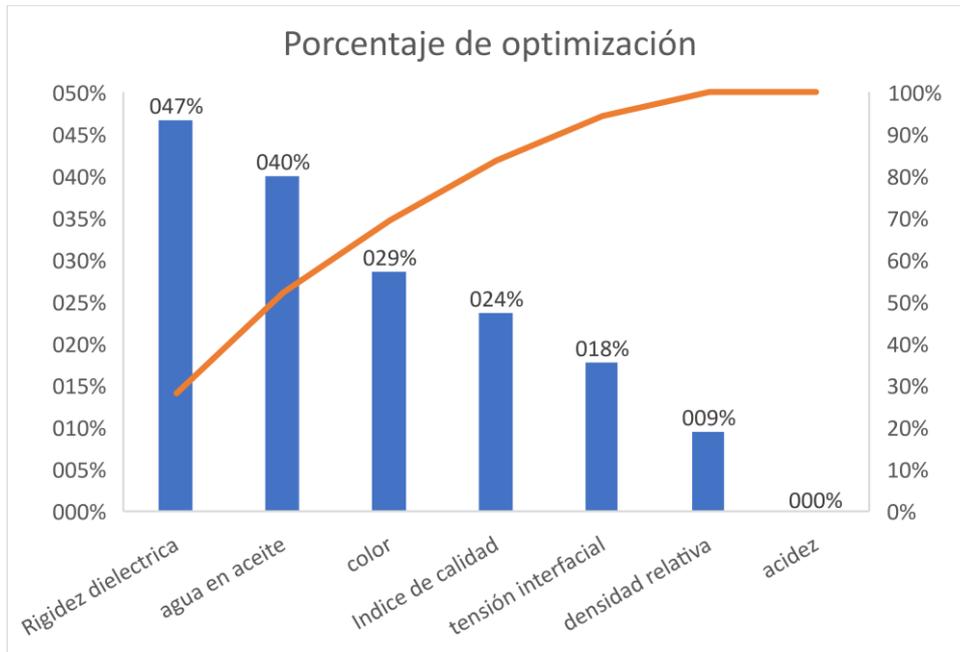
Fuente: Arturo Clavijo y Víctor Soto (2024)

En resumen, este análisis detallado de los efectos del proceso de filtrado del aceite dieléctrico durante tres días diferentes, incluyendo un día con condiciones climáticas adversas de lluvia, revela una mejora significativa en varios parámetros clave de calidad del aceite. Aunque se observan mejoras en la tensión interfacial, el color y la rigidez dieléctrica, es importante considerar la influencia de factores externos como la lluvia en la presencia de agua en el aceite. Estos hallazgos son fundamentales para comprender y mejorar la calidad y el rendimiento del aceite dieléctrico en aplicaciones eléctricas.

4.6. Comprobación de hipótesis

Para validar la hipótesis de que el proceso de optimización incide significativamente en la mejora de la calidad del aceite dieléctrico empleado en transformadores, se procedió a comparar los valores iniciales y finales de varios parámetros críticos. En la figura 53 se detalla un histograma en el que se observa los porcentajes de los parámetros después del filtrado

Figura 53.- Histograma del porcentaje de optimización



Fuente: Arturo Clavijo y Víctor Soto (2024)

El análisis del histograma presentado en la figura 53 revela un marcado incremento en la mejora de la calidad del aceite, tal como lo indica la tendencia ascendente de la línea logarítmica.

Se evidenció un incremento del 17.8% en la tensión interfacial, sugiriendo una mayor resistencia del aceite frente a la infiltración de contaminantes externos. Estos resultados ratifican la noción de que el proceso de optimización puede robustecer las características dieléctricas del aceite, contribuyendo a potenciar la longevidad y eficiencia de los transformadores. Asimismo, la significativa reducción del contenido de agua en el aceite en un 40% corrobora la hipótesis de que dicho proceso puede eficazmente eliminar los contaminantes presentes en el aceite, además de poder tener un margen de mejora elevando su calidad y rendimiento.

No obstante, es crucial señalar que no todos los parámetros manifestaron mejoras notables. Mientras la rigidez dieléctrica experimentó un incremento del 46.7%, destacando como el parámetro con mayor porcentaje de optimización, indica una mayor capacidad de resistencia a la conducción eléctrica, otros como el color y la densidad

relativa mostraron una optimización del 28.6% y 9.5%, respectivamente. Además, se observa que no hubo cambios en la acidez, así destacando como el parámetro con menor porcentaje de optimización en el histograma. Estos resultados sugieren que el proceso de optimización puede inducir efectos diversos en distintos aspectos de la calidad del aceite. A pesar de estas variaciones, el aumento general del índice de calidad en un 23.7% sustenta la premisa de que el proceso de optimización tiene el potencial de mejorar la calidad global del aceite dieléctrico utilizado en transformadores.

Los impactos resultantes del tratamiento del aceite dieléctrico mediante procedimientos de filtrado en el desempeño y la longevidad de los transformadores eléctricos son variados y pueden ser analizados a través de los datos proporcionados. Por ejemplo, se evidencia un incremento del 17.8% en la tensión interfacial, lo cual sugiere una mejora en la capacidad del aceite para resistir la penetración de contaminantes, lo que posiblemente resulte en una mayor durabilidad y eficiencia de los transformadores. Además, aunque el contenido de agua en el aceite en haya aumentado en un 40% por diferentes factores de clima y también de la misma tierra filtrante, indica que hay un margen de mejora en el proceso de optimización dando la posibilidad de mejora en la calidad del aceite, lo que podría extender la vida útil de los transformadores al reducir el riesgo de daño por humedad. Para optimizar este proceso y maximizar sus beneficios, podrían ser consideradas investigaciones en técnicas de filtrado más avanzadas y eficientes, junto con la aplicación de protocolos de mantenimiento preventivo para asegurar que el aceite se mantenga en condiciones óptimas a lo largo del tiempo.

La reintegración del aceite dieléctrico en el marco de un modelo de economía circular puede tener un impacto considerable en la sostenibilidad ambiental y económica. Los datos indican que el proceso de optimización puede mejorar la calidad del aceite, lo que podría facilitar su reutilización en lugar de su eliminación después de su uso inicial en transformadores. Esto podría disminuir la dependencia de la extracción de nuevos recursos y reducir la generación de residuos, fomentando así un enfoque más sostenible hacia la gestión de los recursos naturales. No obstante, es esencial asegurar que el aceite reciclado cumpla con los estándares de calidad necesarios para su utilización segura en transformadores, lo que podría exigir el desarrollo de tecnologías de reciclaje avanzadas y la aplicación de rigurosos controles de calidad.

La mejora de los procesos de tratamiento del aceite dieléctrico en los transformadores eléctricos puede tener un impacto relevante en la eficiencia energética y la sostenibilidad a largo plazo de la infraestructura eléctrica. Por ejemplo, el aumento en la calidad del aceite puede ocasionar una disminución de las pérdidas de energía debido a una mejor resistencia dieléctrica, lo cual podría llevar a una mejora en la eficiencia operativa de los transformadores. Además, al reducir la necesidad de cambiar el aceite con frecuencia a causa de su deterioro, se pueden reducir los costos vinculados con el mantenimiento y la sustitución de equipos, lo que contribuiría a una mayor sostenibilidad económica y operativa en el ámbito eléctrico.

Las estrategias y prácticas óptimas recomendadas para llevar a cabo la optimización de los procesos de tratamiento de aceite dieléctrico en transformadores eléctricos a nivel industrial pueden abarcar diversas áreas. Estas podrían incluir la adopción de tecnologías de filtrado y purificación de aceite de vanguardia, la implementación de programas regulares de mantenimiento preventivo y la vigilancia constante de la calidad del aceite. Asimismo, sería fundamental proporcionar capacitación al personal en métodos apropiados de manipulación del aceite y asegurar la conformidad con las normativas ambientales y de seguridad aplicables. Además, la colaboración con fabricantes de equipos y proveedores de servicios especializados podría resultar beneficiosa para identificar las soluciones y prácticas más adecuadas para cada entorno específico.

CAPÍTULO V

5.1. Conclusiones

En resumen, el ensayo fue exitoso al verificar y alcanzar el objetivo principal con los resultados deseados, logrados a través de la optimización en la fabricación de un filtro utilizando sílice gel. Esta mejora ha demostrado incrementar el rendimiento del aceite y prolongar su vida útil al mejorar sus parámetros dieléctricos, asegurando su efectividad a largo plazo hasta que sea necesario un nuevo proceso de recuperación.

En el apartado de los objetivos específicos se lograron cumplir en los siguientes apartados:

Se ha evidenciado a través de la mejora del procedimiento de termovaciación la utilización efectiva de un filtro compuesto por sílice gel, un recurso económico, que ha mejorado los parámetros de tensión interfacial y color, demostrando así la viabilidad de reutilizar el aceite y restaurarlo casi al nivel de un producto nuevo.

En el análisis del impacto en las propiedades dieléctricas, se obtuvieron los resultados deseados, logrando una mayor resistencia y prolongación del tiempo de vida del aceite a través de nuestra optimización del filtro con sílice gel. Esto se reflejó en un aumento de la rigidez dieléctrica en 40 kV, cumpliendo con los estándares requeridos (ASTM D877/D877M, Procedimiento A, 2019). Además, se observaron mejoras en otras propiedades, como el color (1,5) y la tensión interfacial (36,2), alcanzando resultados aceptables y aproximándose a las características de un aceite dieléctrico nuevo. En resumen, se logró mejorar estas características del aceite dieléctrico para prolongar su vida útil y facilitar su reutilización.

Durante el proceso de análisis de impurezas, se observó la presencia de materiales en suspensión en el aceite no filtrado, como lodos y residuos quemados, posiblemente de origen cobre, lo que resultaba en un aspecto desfavorable con un tono oxidado anaranjado. Al emplear la técnica de filtrado, se logró eliminar estos residuos suspendidos utilizando pre-filtros presentes en el equipo de termovaciación. Sin embargo, se encontró que la sílice gel utilizada en el filtro demostró una mayor eficacia en la absorción de lodos y materiales en suspensión, así como en la reducción del color inicial. Esta conclusión se respaldó al sustituir la sílice gel usada por una nueva, lo que resultó en una significativa absorción

del color y las partículas suspendidas presentes en el aceite que se tomó como muestra para este proyecto. Como se puede apreciar en las figuras previamente presentadas, este cambio logró cumplir con el objetivo específico de reducir considerablemente las impurezas del aceite dieléctrico mediante la optimización del filtro con sílice gel.

Este aspecto resalta la eficacia de la sílice gel no solo en términos de recuperación de la tensión interfacial y el color, sino también en su eficiencia económica, ya que su uso no implica un gasto significativo y su funcionalidad puede ser aprovechada en un solo día laboral. A pesar del aumento en el contenido de agua en el aceite, este se mantiene dentro de los límites aceptables. Este problema se resuelve rápidamente al incrementar el tiempo de filtrado y el uso de la máquina de termovació, lo que permite reducir el nivel de contenido de agua en cuestión de días de trabajo. Del mismo modo, con el tiempo y el proceso de filtrado prolongado, se logró reducir la acidez del aceite hasta alcanzar niveles comparables a los de un aceite nuevo.

En relación con el contenido de agua, a pesar de su aumento, representa un riesgo dado que todo aceite dieléctrico nuevo posee cierto nivel de humedad. Aunque durante el proceso de filtrado la sílice gel expulsa el contenido de agua que contenía almacenado, se soluciona al prolongar el tiempo de filtrado y el uso de la máquina de termovació, cuya principal función es eliminar la humedad presente en el aceite, solventando así esta preocupación. Es esencial mantener la temperatura óptima del calentador para evitar comprometer las características del aceite durante este proceso.

5.2. Recomendaciones

Se sugiere en esta sección que se incremente el tiempo de trabajo durante el proceso de termovaciación y filtrado, lo que contribuirá a mejorar los parámetros del aceite dieléctrico y a obtener resultados óptimos. Además, es importante monitorear que el calentador de la máquina no afecte las propiedades del aceite dieléctrico y trabajar en condiciones que eviten la exposición a la humedad o ambientes lluviosos, ya que esto podría ocasionar un aumento significativo en este parámetro.

Una sugerencia relevante relacionada con el filtro desarrollado para mejorar este proceso se centra en el sellado final. Nos hemos enfrentado a ciertos desafíos, como la fuga de aceite del filtro, especialmente en la zona de la tapa de sellado. Esto se debe a la necesidad de incorporar más sellos tipo grifo para garantizar una mayor presión y sellado del filtro, lo que permitirá que la presión de filtrado sea efectiva y, por ende, asegurar el correcto funcionamiento del circuito.

Se sugiere realizar un pre-secado del material filtrante, en este caso la sílice gel, antes de utilizarlo en el filtro. Este procedimiento sería beneficioso ya que este material, al igual que otros, suele contener cierto nivel de humedad que se libera al comenzar el proceso de filtrado y calentamiento. Con un pre-secado adecuado, se lograría que el material absorba de manera más eficiente las impurezas presentes en el aceite dieléctrico en tratamiento.

Para prevenir el exceso de esfuerzo en la máquina de termovaciación al incrementar la cantidad de aceite dieléctrico de 40 a 100 galones o lo que pueda manejar la máquina, posteriormente, se debe agregar el aceite adicional de forma gradual, mientras se supervisan de cerca los niveles de fluido y la presión, con el fin de evitar posibles excesos, también es importante observar que el nuevo nivel de aceite se encuentre dentro de los parámetros establecidos por el fabricante.

Los objetivos del estudio han sido logrados exitosamente, evidenciando la efectividad del método de filtración aplicado. Se recomienda que los hallazgos obtenidos sirvan como base para futuras investigaciones que investiguen el empleo de diferentes materiales filtrantes biodegradables en proyectos de tesis relacionados.

BIBLIOGRAFÍA

- Durón, O. E. R. (2023). *Procesos de extracción de humedad de la parte activa de los transformadores*.
autores, V. (2020). Libro de actas. II Congreso Internacional Online sobre Tecnología e Ingeniería. In *Libro de actas. II Congreso Internacional Online sobre Tecnología e Ingeniería*. Editorial Científica 3Ciencias. <https://doi.org/10.17993/ingytec.2020.64>
- Carhuamaca, D., Sandy, H., Espinoza, M., Erika, Y., Nakayo, J., & Leonardo, J. (2022). *FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Extracción del Aceite Dieléctrico de la Tierra Fuller mediante el lavado y secado para su reutilización como Adsorbente Industrial*.
- Esteban, A. :, & Piñapil, J. (2023). UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE FACULTAD DE INGENIERÍA MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL.
- Freire, A., Astudillo, J., Quinatoa, C., & Arias, F. (2023). Interpretación de Gases Disueltos en Aceite Dieléctrico Mediante Bosques Aleatorios Para la Detección de Anomalías en Transformadores de Potencia. *Revista Técnica "Energía,"* 19(2), 90–98. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v19.n2.2023.544>
- Intoxicación por plomo y su impacto en la práctica clínica: artículo de revisión. (2022). *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(1), 4176–4189. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i1.1792
- Pérez Galided, Á. J. (2020). Diagnóstico del manejo de aceites usados en el municipio de Pasto, departamento de Nariño. *Visión Empresarial*, 10, 106–121. <https://doi.org/10.32645/13906852.1013>
- Romero Ferreira, J. A. (2021). Tratamiento de aceite dieléctrico residual en la Empresa Biolubricantes SAS, empleando tierras de blanqueo y Mejorador de Índice De Viscosidad (MIV), para su aplicación como base lubricante en motores de bajo rendimiento.
- Ronderos, M. M., & Guerra, J. P. (2020). Avance en el diagnóstico del aislamiento en Transformadores de Potencia basado en técnicas RVM (Recovery Voltage Measurements).
- Tibanlombo, V., Ramírez, J., Granda, N., & Quilumba, F. (2020). Transformer Insulation Condition Assessment by Evaluation of High Voltage IFRA Measurements. *Revista Politecnica*, 45(1), 39–48. <https://doi.org/10.33333/rp.vol45n1.04>
- Chapoñan, S., & Henry, H. (2023). Plan para minimizar el impacto ambiental negativo por redes eléctricas de distribución, en desuso, de las empresas concesionarias de energía eléctrica, distrito de Guadalupe. Repositorio Institucional UNPRG, Maestría en Ciencias con mención en Ingeniería Ambiental (64). <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/11493>.
- Jeimmy Carolina, N. G. (2021). PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE PROCESOS DE RECICLAJE DE ACEITES INDUSTRIALES DENTRO DE LA EMPRESA CON EL FIN DE REDUCIR COSTOS DE OPERACIÓN. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1446>
- Leonardo Daniel, M. T. (2019). PROPUESTA DE UN PLAN DE GESTIÓN PARA DISPOSICION FINAL DE LOS ACEITES DE LUBRICANTES PROCEDENTES DE TALLERES AUTOMOTRIZ DEL DISTRITO PILLCO MARCA – HUÁNUCO – 2019. <http://distancia.udh.edu.pe/handle/123456789/2102>

- Emilio Segura Carballo, R., Rodrigo Arias Hernández, J., & Eduardo Chaves Lara, D. (2019). EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN PARA LA ATENCIÓN DE LOS DERRAMES DE ACEITE DE LOS TRANSFORMADORES DE UNA EMPRESA DEL ÁREA METROPOLITANA. <http://repositorio.utn.ac.cr:8080/xmlui/handle/123456789/225>
- Lenin Aníbal, M. R. (2019). Determinación de la contaminación por desechos de aceites dieléctricos, en los servicios de reparación y mantenimiento de transformadores del taller Transforman en Manta, en el periodo enero - junio 2018. <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/4330>
- Ronderos, M. M., & Guerra, J. P. (2020). Avance en el diagnóstico del aislamiento en Transformadores de Potencia basado en técnicas RVM (Recovery Voltage Measurements).
- Ray, P. F. (2020). Evaluación de la eficacia de un consorcio bacteriano para la biorremediación de suelos contaminados por aceites dieléctricos. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/49878>
- Luis Alberto Gonzales Arrasco. (2021). DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA TRATAMIENTO DE BAJOS VOLÚMENES DE ACEITE DIELECTRICO (PCB) PARA SU REUTILIZACIÓN EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN AÉREO DE MEDIA TENSIÓN EN LA CIUDAD DE CHICLAYO. <https://orcid.org/0000-0003-3941-9581>
- Guerrero Falcones, A. M., & Piguave Morán, P. S. (2019). Determinación cualitativa y cuantitativa de bifenilos policlorados (PCBs) en aceites dieléctricos de transformadores en empresas agroindustriales del cantón Quevedo (Bachelor's thesis, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química).
- García Vera, L. E., & Zhunaula Palas, M. A. (2022). Actualización del manual de construcción, cálculo, instalación, operación y mantenimiento de transformadores de pequeña y mediana potencia (Bachelor's thesis).
- Martínez, E. G. (2010). Diagnóstico y mantenimiento a transformadores en campo. Gerencia y Diseño.

APÉNDICE/ANEXOS

Figura 54.-Reporte de análisis

1150	DIOXIDO DE CALCIO				
63433	Nitrógeno				
25969	Oxígeno				
172	TDCG (ppm)				
9.07	Total Gas Disuelto (%)				

CALIDAD ACEITE					
Anteriores	2022-10-27	Parámetros	Código de Alerta (T/R)	Método Prueba	
		Agua en Aceite (ppm)		WI017-00	
	8	Agua en Aceite (ppm) ✓		D 1533-20	
	29.1	Tensión Interfacial (mN/m) ←		D 971-20	
	0.02	Acidez (mg KOH/g) ←		D 974-14e2	
	<2.5	Color ←		D1500-12	
		Apariencia Visual		D 1524-15	
		Ruptura Dieléctrica (kV)		D 877M-19	
	75	Ruptura Dieléctrica 2 mm (kV)		D 1816-19	
		Ruptura Dieléctrica 2.5 mm (kV)		IEC 60156	
	0.044	Factor de Potencia @ 25 °C (%)		D 924-15	
		Factor de Potencia @ 90 °C		IEC 60247	
	2.07	Factor de Potencia @ 100 °C (%)		D 924-15	
	0.8895	Gravedad Específica		D 1298-12b	
	< 0.02	Inhibidor de Oxidación DBP (wt. %)		D 4768-11(2019)	
	0.25	Inhibidor de Oxidación DBPC (wt. %)		D 4768-11(2019)	
	< 1	Aroclor 1242		D 4059-2018	
	< 1	Aroclor 1248		D 4059-2018	
	< 1	Aroclor 1254		D 4059-2018	
	< 1	Aroclor 1260		D 4059-2018	
	< 1	PCB - Contenido Total Aroclor (ppm)		D 4059-2018	
		Corr. 4a Método Sulfuro Cobre		D 1275-15	
	< 5	5-Hydroxymethyl-2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15	
	< 5	Furfuryl alcohol (ppb)		D 5837-15	
	120	2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15	
	< 5	2-Acetylfruran (ppb)		D 5837-15	
	< 5	5-Methyl-2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15	

*** Morgan Schaffer es un laboratorio acreditado ISO/IEC 17025 ***

COMENTARIOS: Transformadores de CNEL Santa Elena
 CNEL S/E Chanduy TR1, No.Serie 9424090
 Los análisis y mediciones de selección en este reporte se basan en material e información suministrada por el cliente. Morgan Schaffer Ltd no se responsabiliza o garantiza implícita o explícitamente que el contenido de la muestra recibida en este laboratorio es el mismo que todo el material examinado. Morgan Schaffer Ltd no se

Resultados de los análisis realizados al aceite dieléctrico previo a ser tratado en el filtro construido por Soto-Clavijo

Figura 55.- Preparación del filtro propuesto



Reemplazo del material filtrante a ser utilizado

Figura 56.-Arrancando motor eléctrico



Instalación de un generador eléctrico que permitirá el funcionamiento del sistema y ayudará a evaluar la eficiencia del filtro

Figura 57.- Añadiendo los brazos para hacer presión



Revisión del sellado hermético del filtro previo a ponerlo en operación.

Figura 58.- Modelo del circuito



Líneas de ingreso y salida al sistema(filtro) previo a su evaluación

Figura 59.- Modelo del circuito conectado a la máquina de termovació



Figura 60.- Instalación del material filtrante al equipo previo a realizar pruebas



Figura 61.- Foto completa del circuito



Figura 62.- Comparación de muestras



Figura 63.- Máquina de termovacío



Figura 64.-Botellas de vidrio color ámbar



Botellas de color ámbar utilizadas para la toma de muestra antes y después de la evaluación del filtro

Figura 65.-Revisión de las medidas aplicadas para la construcción del filtro



Figura 66.- Tierra contaminada



Figura 67.-Colocación del material filtrante para la parte experimental del proyecto



Figura 68.-Rotulación de muestras



Figura 69.-Observando la cantidad de aceite dieléctrico dentro de la máquina de termovació



Figura 70.-Resultados del aceite tratado después de pasar por el equipo propuesto

Cliente:	NELSON ARTURO CLAVIJO		
Orden de Trabajo:	# 87	Contacto/Dirección:	Nelson Arturo Clavijo/Guayaquil

INFORME DE ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICO

No. 24304

DATOS DEL TRANSFORMADOR **INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE**

Serie:	No Suministrada	Fecha de Toma de Muestra:	2024-02-09
Marca:	No Suministrada	Año de Fabricación:	No Suministrada
Tensión:	No Suministrada	Vol. Aceite:	No Suministrada
Potencia:	No Suministrada	Ubicación:	No Suministrada
*T. de Muestra:	No Suministrada	Observación:	-

DATOS DEL ENSAYO

Fecha de Recepción:	2024-02-09	Producto Analizado:	Aceite Dielectrico
Fecha de Análisis:	2024-02-09	Toma de Muestra:	Cliente
Fecha del Reporte:	2024-02-09		

Condiciones del Análisis en el Laboratorio	
Temperatura Ambiente (°C):	27,488
% Humedad Relativa:	38
	Temperatura del Aceite (°C): 27,461

ENSAYOS	EQUIPO DE ENSAYOS	RESULTADOS	INCERTIDUMBRE	UNIDAD	CALIFICACIÓN
COLOR ASTM D1500-12 (2017)	CO-01	< 1,5	±0,5	Unidades de Color ASTM	AC
DENSIDAD RELATIVA (15°C/15°C) ASTM D1298-12b (2017)	DE-01 *DE-02 DE-03	0,8780	±0,0048	Adimensional-1	AC
NÚMERO ÁCIDO ASTM D974 (2022)	BU-01	0,02	±0,0077	mgKOH/g	AC
TENSIÓN INTERFACIAL ASTM D971 (2020)	TI-01	36,2	±0,4	mN/m	AC
RIGIDEZ DIELECTRICA ASTM D877/D877M PROCEDIMIENTO A (2019)	RD-01	40	±7	kV	AC
CONTENIDO DE AGUA ASTM D1533 (2020)	CH-01 *CH-02	22	±5 ±6	mg/kg (ppm)	AC

*Equipo de Ensayo Utilizado

Valores de Rigidez Dieléctrica	
	41,9
	40,7
Lecturas ASTM D-877 /877M-2019(kV)	40,4
	34,7
	39,8

Condiciones de Tension Interfacial	
Temperatura del Agua (°C)	27,474
Temperatura del Aceite (°C)	27,422
Densidad del Agua (g/mL)	0,997
Densidad del aceite (g/ml)	0,868

NOTAS:

1. Los resultados se relacionan únicamente con los items sometidos a ensayo y aplican a la muestra tal y como se recibió en el laboratorio.
2. El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente.


ELABORÓ
Ing. Cristina Briones
Asistente de Laboratorio


REVISÓ/AUTORIZA
Ing. Andrés Rodríguez
Jefe de Laboratorio


APROBÓ
Ing. Andrés Briones
GERENTE GENERAL

FIN DEL INFORME

Figura 71.-Criterios estándar del aceite dieléctrico

ANEXO INFORME FÍSICO-QUÍMICO
N° 24304

REGLA DE DECISIÓN:

La declaración de conformidad se establece en base al resultado de ensayo
± el valor de la incertidumbre contra los Criterios de SD Myers.

* CRITERIOS DE LA S.D. MYERS PARA LA DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD

Aceite En Uso*			Aceite Nuevo*	Parámetro
Aceptable (AC)	Cuestionable (CU)	Inaceptable (IN)		
≤ 3,5	N/A	> 3,5	< 0,5	COLOR ASTM D1500-12 (2017)
0,840-0,910	< 0,840	> 0,91	0,910 máx	DENSIDAD RELATIVA (15°C/15°C) ASTM D1298-12b (2017)
≤ 0,05	> 0,05 ≤ 0,1	> 0,10	0,03 máx	NÚMERO ÁCIDO ASTM D974 (2022)
≥ 28	< 28 ≥ 22	< 22	40 min	TENSIÓN INTERFACIAL ASTM D971 (2020)
≥ 30	< 30 ≥ 25	< 25	30 min	RIGIDEZ DIELECTRICA ASTM D877/D877M PROCEDIMIENTO A (2019)
< 30	≥ 30	> 35	35 máx	CONTENIDO DE AGUA ASTM D1533 (2020)

NÚMERO ÁCIDO	0,01744	TENSIÓN INTERFACIAL	36,2
Índice de Calidad	2075,00		

OPINIONES E INTERPRETACIONES

DIAGNOSTICO

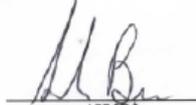
Los resultados indican condiciones normales del aceite dieléctrico.
La rigidez dieléctrica, el contenido de agua, el número ácido y la tensión interfacial se encuentran en valores considerados normales.

RECOMENDACIONES

Tomar muestra en 12 meses.


ELABORÓ
Ing. Cristina Briones
Asistente de Laboratorio


REVISÓ/AUTORIZA
Ing. Andrés Rodríguez
Jefe de Laboratorio


APROBO
Ing. Andrés Briones
GERENTE GENERAL