

Propiedades dieléctrica del nanofluido de aceite/CrOOH para ser usado como aceite de transformador de potencia

PABLO ANDRÉS SALDAÑO AGUILERA

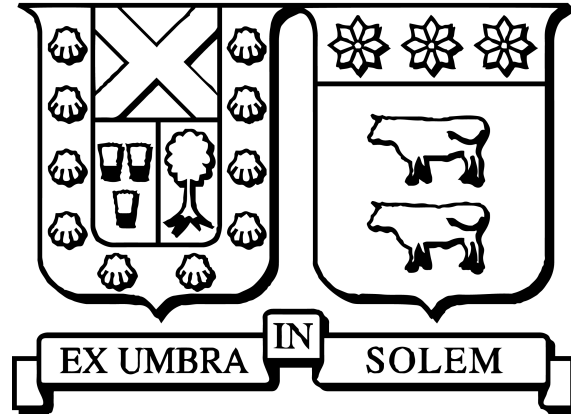
2025

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesor Guía:
Prof. Leonardo Vivas (UTFSM)

Comisión:
Prof. Jorge Ardila (UTFSM)

Santiago, 28/04/2025.



Propiedades dieléctrica del nanofluido de aceite/CrOOH para ser usado como aceite de transformador de potencia

PABLO ANDRÉS SALDAÑO AGUILERA

2025

“No te avergüences por ser débil, sino por permanecer débil.”
—*Sakamoto, Shion*

Agradecimientos

Al finalizar un proceso tan desafiante, es imposible no reflexionar sobre el camino recorrido y las personas que han estado a mi lado en cada paso. Por ello, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi madre, Katherine, sin cuya presencia nada de esto sería posible; a mi padre, Juan Pablo, quien me enseñó el valor de la perseverancia; a mi hermana, Paz Belén, quien me brinda alegrías y me llena de orgullo. Finalmente, quiero agradecer a mi pareja, Constanza, quien, sin ningún compromiso, eligió creer en mí y, con su luz, se convirtió en un pilar fundamental en mi vida. A ustedes, mi familia, les debo todo lo que soy.

De igual manera, agradezco a mis profesores, quienes contribuyeron a mi enseñanza y formación como profesional. En especial a mi profesor guía, Leonardo Vivas, cuya guía, paciencia y conocimiento han sido fundamentales en el desarrollo de este trabajo. A lo largo de este proceso, su apoyo constante y sus valiosas sugerencias han enriquecido enormemente mi aprendizaje. Gracias por compartir su experiencia y por siempre estar dispuesto a ofrecerme su tiempo y consejo. Sin su orientación, este trabajo no habría sido posible.

No puedo dejar de agradecer a las personas que conocí a lo largo de mi etapa universitaria, quienes hicieron de este desafío un camino más llevadero. En este recorrido, tuve la fortuna de encontrar grandes amigos, aquellos que, con empatía y compañerismo, me tendieron una mano en los momentos difíciles. Juntos, no solo enfrentamos retos, sino que también construimos recuerdos y experiencias que atesoraré siempre.

Índice de contenidos

| | |
|---|-----------|
| Índice de contenidos | I |
| Índice de figuras | III |
| Índice de tablas | V |
| Resumen | 1 |
| Abstract | 2 |
| 1. Introducción | 3 |
| 1.1. Objetivos | 6 |
| 1.1.1. Objetivo general | 6 |
| 1.1.2. Objetivos específicos | 6 |
| 2. Estado del arte | 7 |
| 2.1. Nanopáticas | 7 |
| 2.2. Nanofluidos | 8 |
| 2.3. Pruebas en nanofluido | 10 |
| 2.3.1. Descargas parciales | 10 |
| 2.3.1.a. Descargas parciales superficiales | 11 |
| 2.3.1.b. Descargas parciales internas | 11 |
| 2.3.1.c. Descargas parciales tipo corona | 12 |
| 2.3.2. Descargas tipo impulso | 13 |
| 2.3.2.a. Ensayos de Impulso Tipo Rayo | 14 |
| 2.3.2.b. Circuito generador de tipo impulso | 16 |
| 2.3.3. Rigidez Dieléctrica | 17 |
| 2.3.4. Detección de gases disueltos | 18 |
| 2.3.5. Tangente delta | 19 |
| 2.3.6. Espectroscopía UV-Visible | 20 |
| 3. Montaje experimental y materiales | 22 |
| 3.1. Síntesis de nanopartículas | 22 |
| 3.2. Síntesis del nanofluido | 23 |
| 3.3. Rigidez Dieléctrica | 24 |
| 3.4. UV-Visible | 25 |
| 3.5. Montaje Impulso | 27 |
| 3.6. Tangente delta | 29 |
| 3.7. Análisis de gases disueltos | 30 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4. | Análisis y resultados | 33 |
| 4.1. | Nanopartículas y Nanofluido | 33 |
| 4.2. | UV-Visble | 35 |
| 4.3. | Rigidez Dieléctrica | 37 |
| 4.4. | Descargas parciales tipo impulso | 38 |
| 4.5. | Tangente delta | 41 |
| 4.6. | Análisis de gases Disueltos | 42 |
| 5. | Conclusiones | 46 |
| 6. | Anexos | 48 |
| 6.1. | Datos cuantitativos y tablas de resultados | 48 |
| 6.2. | Rigidez Dieléctrica | 48 |
| 6.2.1. | Descargas tipo impulso | 49 |
| 6.2.2. | Tangente delta | 50 |

Índice de figuras

| | | |
|-------|---|----|
| 1.1. | Gráficas de fallas de transformadores de potencia. | 3 |
| 2.1. | Desglose de elementos que componen a los NFs. | 8 |
| 2.2. | Elementos mediante la técnica de <i>dos pasos</i> | 9 |
| 2.3. | Comportamiento de tensión y corriente ante una DP. | 10 |
| 2.4. | Descargas parciales superficiales. | 11 |
| 2.5. | Descarga parcial del tipo interna con ubicación variada. | 12 |
| 2.6. | Geometrías varias de defectos de DPs internas. | 12 |
| 2.7. | Descarga del tipo corona. | 13 |
| 2.8. | Curva general de un impulso tipo rayo | 14 |
| 2.9. | Impulso Tipo Rayo de frente cortado. | 15 |
| 2.10. | Impulso Tipo Rayo de cola cortada. | 16 |
| 2.11. | Circuito generador de impulso con resistencia en serie. | 16 |
| 2.12. | Circuito generador de impulso con resistencia en paralelo. | 16 |
| 2.13. | Relación de corriente resistiva y capacitiva para tangente delta. | 20 |
| 2.14. | Espectro electromagnético a lo largo de las longitudes de onda. | 20 |
| 3.1. | Solución resultante al seguir proceso de preparación de nanopartículas. | 23 |
| 3.2. | Proceso utilizado para la creación de nanofluido aceite/ <i>CrOOH</i> | 24 |
| 3.3. | Equipo <i>BAUR</i> utilizado en ensayo Rigidez dieléctrica | 24 |
| 3.4. | Objeto de ensayo sin agitador. | 25 |
| 3.5. | Objeto de ensayo con agitador. | 25 |
| 3.6. | Equipo utilizado en ensayo estroscopía visible. | 26 |
| 3.7. | Referencia blanco con hexano. | 26 |
| 3.8. | Muestras de aceite y nanofluidos utilizados. | 26 |
| 3.9. | Circuito para ensayos de tipo impulso. | 28 |
| 3.10. | Recipiente de aislante líquido (objeto de ensayo) para ensayo de impulso. | 28 |
| 3.11. | <i>TOR-3 LSL</i> utilizado para medición de tangente delta. | 29 |
| 3.12. | Esquema de la nariz electrónica. | 30 |
| 3.13. | Placa referencial con sensores de medición. | 31 |
| 4.1. | Nanopartículas de <i>CrOOH</i> en diferentes escalas usando SEM. | 33 |
| 4.2. | Imagen TEM del material <i>CrOOH</i> | 34 |
| 4.3. | Imagen TEM del material <i>CrOOH</i> sintetizado en escala de 200[<i>nm</i>]. | 34 |
| 4.4. | Imagen TEM del material <i>CrOOH</i> sintetizado en escala de 100[<i>nm</i>]. | 35 |
| 4.5. | Imagen TEM del material <i>CrOOH</i> sintetizado en escala de 50[<i>nm</i>]. | 35 |
| 4.6. | Gráfica de absobancia vs longitud de onda en ensayo UV-Visible. | 35 |
| 4.7. | Absorbancia para baja longitud de onda. | 36 |
| 4.8. | Absorbancia para alta longitud de onda. | 37 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.9. | Tensiones de ruptura promedios de 20, 40 y 60 impulsos. | 39 |
| 4.10. | Desviación porcentual de tensiones en base al número de impulsos. | 39 |
| 4.11. | Curva de impulsos para muestras de aceite en 20 y 40 rupturas. | 40 |
| 4.12. | Curva de impulsos para muestras de aceite con ácido oleico. | 40 |
| 4.13. | Curva de impulsos para muestras de nanofluido 10[mg/L]. | 40 |
| 4.14. | Curva de impulsos para muestras de nanofluido 30[mg/L]. | 40 |
| 4.15. | Valores de tangente δ para muestras de fluido aislante. | 41 |
| 4.16. | Valores de resistividad relativa para muestras de fluido aislante. | 42 |
| 4.17. | Gráfico radial de variación de tensión de sensores para muestras con 20 rupturas. | 43 |
| 4.18. | Gráfico radial de variación de tensión de sensores para muestras con 40 rupturas. | 44 |
| 4.19. | Gráfico radial de variación de tensión de sensores para muestras con 60 rupturas. | 45 |

Índice de tablas

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1. | Dimensiones de electrodos en base a norma <i>IEC-60156</i> | 25 |
| 3.2. | Tipos de sensores, especificación del fabricante y sensibilidad a los gases de interés. | 32 |
| 4.1. | Rigidez dieléctrica con concentración de 10 y 40 [mg/L]. | 37 |
| 4.2. | Rigidez dieléctrica con concentración de 10 y 30 [mg/L]. | 38 |
| 4.3. | Gases que pueden detectar los sensores con mayor variación de tensión. | 45 |
| 6.1. | Valores obtenidos de primer ensayo de rigidez dieléctrica según norma <i>IEC-60156</i> | 48 |
| 6.2. | Valores obtenidos de segundo ensayo de rigidez dieléctrica según norma <i>IEC-60156</i> | 49 |
| 6.3. | Tensiones de ruptura en ensayo de impulso para Aceite desgasificado. | 49 |
| 6.4. | Tensiones de ruptura en ensayo de impulso para Aceite con ácido oleico desgasificado. | 49 |
| 6.5. | Tensiones de ruptura en ensayo de impulso para nanofluido con concentración de 10[mg/L] desgasificado. | 49 |
| 6.6. | Tensiones de ruptura en ensayo de impulso para nanofluido con concentración de 30[mg/L] desgasificado. | 50 |
| 6.7. | Medición tangente delta, capacitancia, resistividad y permitividad de aceite desgasificado. | 50 |
| 6.8. | Medición tangente delta, capacitancia, resistividad y permitividad de aceite con ácido oleico desgasificado. | 50 |
| 6.9. | Medición tangente delta, capacitancia, resistividad y permitividad de Nanofluido a 10 [mg/L] desgasificado. | 50 |
| 6.10. | Medición tangente delta, capacitancia, resistividad y permitividad de Nanofluido a 30 [mg/L] desgasificado. | 51 |

Resumen

Los transformadores son esenciales en la industria eléctrica por su capacidad para variar tensión y corriente, con una vida útil de 25-30 años. Sin embargo, presentan un 2% de fallas globales, siendo el aislamiento (41%) y los devanados (14%) las principales causas. En el caso del aislamiento en los transformadores, el aceite dieléctrico resulta crítico para el funcionamiento. Así es como los nanofluidos, que combinan aceites con nanopartículas, emergen como una solución para mejorar propiedades dieléctricas y térmicas.

El presente trabajo estudia las propiedades dieléctricas del nanofluido basado en aceite mineral con nanopartículas de $CrOOH$, evaluando su viabilidad como fluido aislante en transformadores de potencia. El estudio demostró que las nanopartículas de $CrOOH$ sintetizadas presentan una estructura amorfa y morfología aglomerada, con tamaños entre 2 y 4[nm], lo que sugiere potencial en aplicaciones que requieren alta superficie específica. La incorporación de estas nanopartículas modificó las propiedades ópticas del fluido, aumentando la absorbancia en rangos específicos de longitud de onda, aunque este efecto no fue lineal con la concentración. En cuanto a las propiedades dieléctricas, se identificó una concentración óptima (10[mg/L]) que maximiza la rigidez dieléctrica, mientras que concentraciones más altas (30 – 40[mg/L]) la reducen, ya que un exceso de nanopartículas reduce la efectividad de los tensioactivos, ayudando a la formación de caminos conductivos. Además, las nanopartículas influyeron en la generación de gases durante descargas dieléctricas, acelerando la descomposición inicial del aceite, pero estabilizándola en etapas avanzadas. Estos hallazgos indican que, aunque los nanofluidos mejoran propiedades clave, su uso requiere una concentración óptima y consideraciones sobre su impacto en el envejecimiento del fluido.

Abstract

Transformers are essential in the electrical industry due to their capacity to vary voltage and current, with a useful life of 25-30 years. However, they have a 2% overall failure rate, with insulation (41%) and windings (14%) being the main causes. In the case of transformer insulation, the dielectric oil is critical for operation. This is how nanofluids, which combine oils with nanoparticles, emerge as a solution to improve dielectric and thermal properties.

The present work studies the dielectric properties of the nanofluid based on mineral oil with *CrOOH* nanoparticles, evaluating its viability as an insulating fluid in power transformers. The study showed that the synthesized *CrOOH* nanoparticles present an amorphous structure and agglomerated morphology, with sizes between 2 and 4[nm], suggesting potential in applications requiring high specific surface area. The incorporation of these nanoparticles modified the optical properties of the fluid, increasing the absorbance in specific wavelength ranges, although this effect was not linear with concentration. Regarding dielectric properties, an optimum concentration (10[mg/L]) was identified that maximizes dielectric strength, while higher concentrations (30 - 40[mg/L]) reduce it, since an excess of nanoparticles reduces the effectiveness of the surfactants, helping the formation of conductive paths. In addition, the nanoparticles influenced the generation of gases during dielectric discharges, accelerating the initial decomposition of the oil but stabilizing it in advanced stages. These findings indicate that, although nanofluids improve key properties, their use requires optimal concentration and consideration of their impact on fluid aging.

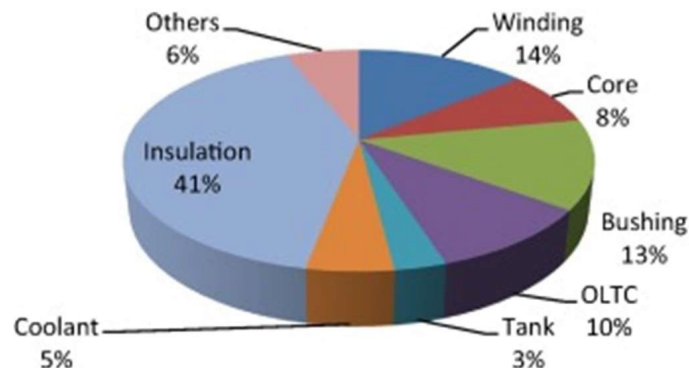
Capítulo 1

Introducción

Los transformadores son utilizados en toda la industria eléctrica debido a la capacidad de variar tensión y corriente, lo que los hace imprescindibles en el ámbito de generación, transmisión y distribución eléctrica. Un transformador de potencia cuenta con una vida útil de entre 25-30 años, que puede, en la práctica, ser prolongada hasta 60 años con el mantenimiento adecuado [1]. Sin embargo, los transformadores pueden producir fallas, a pesar de los esfuerzos que se hacen para llevar un mantenimiento continuo y eficaz. Los transformadores cuentan con un porcentaje global de fallas de 2% [2], resultando en una cantidad importante si consideramos que un transformador es usado en múltiples procesos de la transmisión, distribución y generación eléctrica.

Las fallas en los transformadores se consideran catastróficas por lo que resulta imprescindible conocer la ubicación en donde ocurren estos problemas. En los transformadores, las fallas se producen en gran medida por el aislamiento, que abarca un 41% de los fallos, seguido por las fallas del devanado con un 14% y fallas en el bushing con un 13%. Por su parte, el núcleo contribuye con un 8% y en los cambiadores de toma bajo carga (OLTC) con un 10% [3].

Figura 1.1: Gráficas de fallas de transformadores de potencia.



Fuente: Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities [3].

Otro artículo muestra un estudio estadístico de las ubicaciones de las fallas en las cuales un 41% de las fallas se producen en el OLTC y alrededor de un 19% se debieron a los devanados. Además, se muestra que el origen de las fallas fue de un 53% mecánicas y

un 31 % dieléctricas [1].

Gran cantidad de las fallas se presentan en el aceite del transformador, el cual es un elemento dieléctrico que actúa como aislación y también como refrigerante, lo que lo hace aún más crítico al momento de ser considerado en las fallas de los transformadores. Los tipos de aceite que comúnmente se utilizan en los transformadores son el aceite mineral proveniente del petróleo, con una alta rigidez dieléctrica y una buena capacidad de enfriamiento, siendo el tipo más común de aceites para estos equipos [3]. Por otro lado, se encuentra el aceite vegetal, que cuenta con una mejor vida útil, protege el papel aislante mejor que el aceite mineral y mejora el tiempo de rendimiento del transformador; sin embargo, su coste es mayor al del aceite mineral [4]. Otro tipo de aceite que se utiliza es el sintético, formado por fluidos de silicona y ésteres sintéticos; a pesar de ser más caro que el mineral, cuenta con una mejor estabilidad térmica y mayor resistencia al envejecimiento [3].

Los nanofluidos compuestos de aceites comerciales y nanopartículas se muestran como una solución que mitigue los problemas que se tienen actualmente con el aceite en transformadores de potencia [5]. Distintas nanopartículas han sido probadas en transformadores para verificar si existe un cambio en las propiedades del aceite que puedan mejorar su comportamiento.

Choi and Eastman (*Choi & Eastman, 1995*) realizaron un estudio pionero sobre la conductividad térmica de nanofluidos. En su investigación, concluyeron que al suspender nanopartículas en líquidos convencionales (como agua o etilenglicol), la conductividad térmica de estos fluidos aumentaba significativamente en comparación con los líquidos base sin partículas. Este hallazgo fue crucial, ya que indicaba que los nanofluidos podrían mejorar la transferencia de calor en diversas aplicaciones, superando las limitaciones de los fluidos tradicionales. El estudio fue uno de los primeros en demostrar que las nanopartículas metálicas u óxidos metálicos, cuando se mezclan con líquidos, pueden alterar drásticamente las propiedades térmicas de los fluidos, lo que abrió el campo a nuevas investigaciones y aplicaciones en la ingeniería térmica y el diseño de sistemas de refrigeración [6].

Por otra parte, investigadores concluyeron que los nanofluidos basados en aceite de éster natural, cuando se combinan con nanopartículas de óxido de hierro, mejoran significativamente las propiedades dieléctricas bajo pruebas de degradación acelerada. Específicamente, se observó que la permitividad relativa real y la estabilidad dieléctrica del nanofluido se mantenían más robustas frente a la degradación, en comparación con los aceites base sin nanopartículas, lo que sugiere un mejor rendimiento en aplicaciones eléctricas críticas [7].

Recientemente, *Suhaimi et al. (2022)* concluyeron que los nanofluidos magneto dieléctricos presentan una mejora significativa en la resistencia al colapso dieléctrico en comparación con los aceites aislantes convencionales. La adición de nanopartículas magnéticas, como Fe_3O_4 y Co_3O_4 , a los aceites aislantes (tanto minerales como ésteres sintéticos) aumenta la capacidad de estos fluidos para soportar mayores tensiones eléctricas antes de que ocurra la ruptura dieléctrica.

Además, se realizó un análisis estadístico de los resultados para validar su fiabilidad, utilizando modelos de regresión y distribuciones estadísticas como Weibull. Este enfoque refuerza la aplicabilidad industrial de estos nanofluidos mejorados para su uso en transformadores y otros equipos eléctricos donde el rendimiento y la estabilidad dieléctrica son críticos. Estos nanofluidos también mostraron una mejor resistencia en condiciones de hu-

medad, lo cual es una ventaja adicional para mejorar la vida útil y el rendimiento de los transformadores [8].

También, Rafiq *et al.* (2021) concluye que los nanofluidos basados en aceite para transformadores presentan mejoras significativas en propiedades térmicas y dieléctricas en comparación con los fluidos convencionales. Al incorporar nanopartículas en el aceite de transformador, se observa un aumento en la conductividad térmica y la resistencia dieléctrica, lo cual es crucial para mejorar la vida útil y la eficiencia de los sistemas de aislamiento en aplicaciones de alta tensión.

Se destaca el uso de nanopartículas como óxidos metálicos (TiO_2 , SiO_2 , CuO y Al_2O_3), nanotubos de carbono, grafeno y metales como el oro, cobre y aluminio para mejorar las propiedades térmicas y eléctricas del aceite de transformador. Estas nanopartículas fueron seleccionadas por su capacidad para incrementar la conductividad térmica y la resistencia dieléctrica del fluido base, proporcionando un mejor rendimiento en aplicaciones de alta tensión. Sin embargo, el artículo también destaca que, a pesar de las ventajas, algunos desafíos persisten, como la estabilidad a largo plazo de los nanofluidos y la tendencia de las nanopartículas a formar agregados, lo que puede afectar las propiedades dieléctricas. Se requieren investigaciones adicionales para optimizar la selección de nanopartículas y sus técnicas de síntesis para lograr una estabilidad duradera y maximizar el potencial de estos fluidos en aplicaciones industriales [9].

Este trabajo se enfoca en la síntesis y caracterización de un nanofluido compuesto por aceite mineral y nanopartículas de $CrOOH$, con el objetivo de evaluar sus propiedades dieléctricas y su idoneidad como fluido aislante. Para ello, se comparan cuatro muestras: aceite mineral limpio, aceite mineral limpio con ácido oleico (10% del volumen de aceite), un nanofluido con una concentración de 10[mg/L] de nanopartículas y otro con 30[mg/L]. Las nanopartículas se sintetizan mediante la técnica *hidrotermal*, mientras que la creación del nanofluido sigue la técnica de *dos pasos*. A continuación, se analizan las propiedades del nanofluido evaluando su comportamiento a través de espectrofotometría, ensayos de resistencia de aislamiento, rigidez dieléctrica y detección de gases tras rupturas dieléctricas. El objetivo es desarrollar un novedoso nanofluido de aceite/ $CrOOH$ destinado a transformadores de potencia.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- Caracterizar dieléctricamente nanofluidos de aceite/*CrOOH* y comparar sus características con las del aceite mineral comercial utilizado en transformadores de potencia.

1.1.2. Objetivos específicos

- Sintetizar nanopartículas de *CrOOH* utilizando la técnica hidrotermal para obtener el material de partida con que se fabricaran nanofluidos de aceite/*CrOOH*.
- Fabricar nanofluidos de aceite/*CrOOH* variando las concentraciones de nanopartículas para controlar la dispersión y estabilidad del nanofluido final.
- Caracterizar las propiedades químicas y ópticas de los nanofluidos con el aceite mineral, empleando técnicas de cromatografía de gases y espectroscopia UV-Visible para hacer un estudio comparativo entre ambos fluidos.
- Comparar las propiedades dieléctricas del nanofluido con el aceite mineral midiendo la rigidez dieléctrica, la actividad de descargas parciales y la tangente delta del nanofluido, siguiendo la normativa IEC o ASTM.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Nanopartículas

El término de *nanopartícula* (abreviado como *NP*) se refiere a partículas de un tamaño muy pequeño del orden de los nanómetros (unidad de medida [*nm*]). Aunque la nanoescala está en medio del mundo macro y micro, una vez que se alcanza el nivel nano, las nanoentidades se describen en términos atómicos, no como sustancias. Esto sugiere que, aunque el nivel nano es intermedio en tamaño, las relaciones entre los niveles macro, molecular y nano se perciben de manera diferente a lo esperado [10].

Las NPs se sintetizan mediante diferentes técnicas las cuales se suelen agrupar en dos categorías, la primera es la categoría *top-down* que consiste en dividir sólidos másicos en partes más pequeñas, siendo un enfoque que puede involucrar la molienda o el desgaste, métodos químicos o la volatilización de un sólido que luego condensa los componentes volatilizados [10]. Sin embargo, la mayoría de los métodos de la categoría *top-down* resultan ser más costosos, por lo cual se prefieren los métodos que utilizan la aproximación *bottom-up*.

La segunda categoría o aproximación *bottom-up* consiste en la formación de nanopartículas mediante la condensación de átomos en una fase gaseosa o de condensación. Este enfoque resulta más popular en la síntesis de nanopartículas. Los más empleados son los que utilizan procedimientos químicos, que por lo general comienzan con la reducción de iones metálicos a átomos metálicos, para luego ser agregados de manera controlada. El método químico es el más conveniente para la obtención de nanopartículas uniformes y pequeñas [10][11].

Dependiendo de su clasificación, las nanopartículas pueden ser optimizadas para aplicaciones específicas, desde mejorar la conductividad eléctrica en materiales hasta aumentar la eficiencia de catalizadores o la resistencia en nanofluidos. A continuación, se mencionan los aspectos en los que se clasifican las nanopartículas [12].

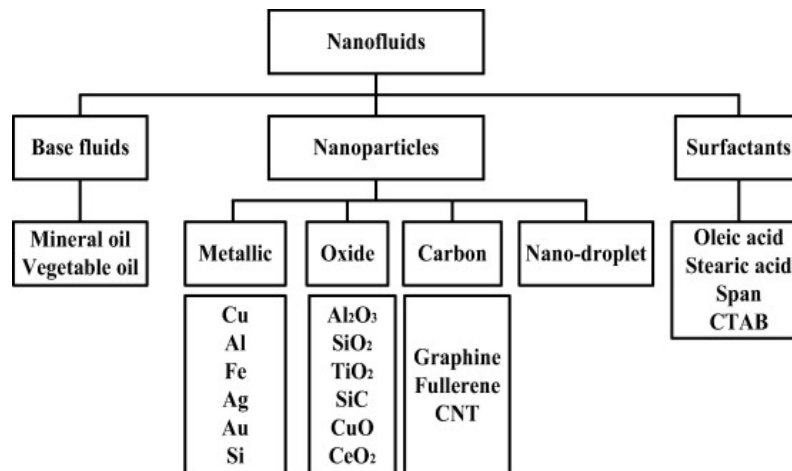
1. Tamaño: El tamaño de las nanopartículas es uno de los factores más críticos para su comportamiento. Partículas más pequeñas suelen tener una mayor relación superficie-volumen, lo que aumenta su reactividad y capacidad de interacción con su entorno.
2. Forma: Las nanopartículas pueden tener formas esféricas, cúbicas, tubulares, entre

- otras. La forma afecta cómo interactúan con otras moléculas y determina su capacidad para adsorber o reaccionar químicamente.
3. Composición química: Dependiendo de si son metálicas, no metálicas, polímeros o compuestos inorgánicos, su comportamiento varía drásticamente.
 4. Superficie: Las propiedades de la superficie, como la rugosidad o las modificaciones químicas, influyen en la reactividad de las nanopartículas y su capacidad para formar suspensiones estables, como en los nanofluidos.
 5. Estado de agregación: La tendencia de las nanopartículas a formar agregados puede afectar sus propiedades ópticas, magnéticas o eléctricas. En algunos casos, se buscan nanopartículas dispersas, mientras que en otros se prefieren agregadas.

2.2. Nanofluidos

Los *nanofluidos* (abreviados como *NFs*) pueden contener nanopartículas de metales, óxidos metálicos o materiales carbonosos, entre otros (como se muestra en la Figura 2.1), con tamaños típicamente entre 1 y 100[*nm*]. Estas nanopartículas pueden mejorar las propiedades térmicas del fluido base, resultando en una mejor transferencia de calor [13]. El proceso de unión entre el fluido y la NP se puede desarrollar mediante los procesos llamados *un solo paso* y *dos pasos*. El método o técnica de *un solo paso* aborda la aglomeración de NPs mediante un proceso continuo que crea y disuelve las nanopartículas directamente en el fluido base, eliminando la necesidad de pasos intermedios como almacenamiento y transporte [14]. Esta técnica asegura una distribución uniforme de NPs manteniéndolas en suspensión de manera estable en el fluido. Sin embargo, no es adecuada para la síntesis de grandes cantidades de nanofluidos, lo que resulta en costos de preparación más altos [14].

Figura 2.1: Desglose de elementos que componen a los NFs.

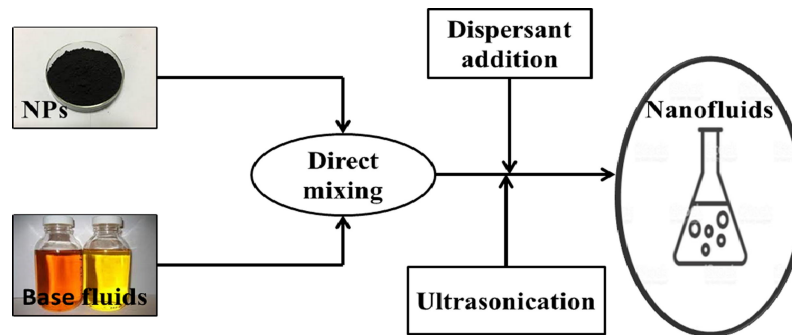


Fuente: Transformer oil-based nanofluid: The application of nanomaterials on thermal, electrical and physicochemical properties of liquid insulation [9].

Por su parte, la técnica de *dos pasos*, cuyo procedimiento se ilustra en la Figura 2.2, es uno de los métodos más comunes puesto que es sencillo y económico, además de permitir

la producción de grandes cantidades de NFs. No obstante, puede haber problemas de estabilidad a largo plazo debido a la tendencia de las nanopartículas a aglomerarse, por lo que requiere el uso de agentes *dispersantes* adicionales para mantener la estabilidad de la suspensión [14]. En el primer paso, las nanopartículas se sintetizan utilizando métodos físicos o químicos formando un polvo seco. En el segundo paso, las nanopartículas sintetizadas se dispersan en el fluido base. Este proceso puede implicar el uso de agentes dispersantes, comúnmente llamados surfactantes, lo que mejora la estabilidad de las NPs y técnicas de agitación como la *sonicación* o la agitación mecánica para asegurar una distribución uniforme y evitar la aglomeración de las partículas [14].

Figura 2.2: Elementos mediante la técnica de *dos pasos*.



Fuente: Transformer oil-based nanofluid: The application of nanomaterials on thermal, electrical and physicochemical properties of liquid insulation [9].

El principal beneficio de los nanofluidos radica en sus propiedades mejoradas:

1. Conductividad térmica: Superior a la de los fluidos base, permite una transferencia de calor más eficiente.
2. Viscosidad: Aumenta con la adición de nanopartículas, lo que debe ser gestionado para evitar efectos adversos en el flujo.
3. Estabilidad: Fundamental para evitar la sedimentación y mantener las propiedades a largo plazo.

Específicamente, se logran presentar ventajas de los nanofluidos en transformadores de potencia, ya que estos requieren sistemas de enfriamiento eficientes para manejar las pérdidas de calor generadas por la resistencia de los devanados y el núcleo magnético. El uso de nanofluidos ofrece:

- Mejora del enfriamiento: La conductividad térmica mejorada reduce las temperaturas de operación.
- Reducción de puntos calientes: Minimiza la degradación térmica del aislamiento.
- Mayor vida útil: Un mejor control térmico prolonga la vida útil del equipo.

Diversas investigaciones han explorado el uso de nanofluidos para mejorar las propiedades dieléctricas y térmicas de los aceites de transformador. Por ejemplo, estudios con

nanopartículas de Al_2O_3 han demostrado reducciones significativas en la temperatura de operación y mejoras en la rigidez dieléctrica [9].

Las técnicas de prueba comunes utilizadas para evaluar el desempeño de los nanofluidos en transformadores incluyen pruebas de rigidez dieléctrica , análisis de gases disueltos (DGA), espectroscopía UV-Visible, descargas parciales y medición de tangente delta.

2.3. Pruebas en nanofluido

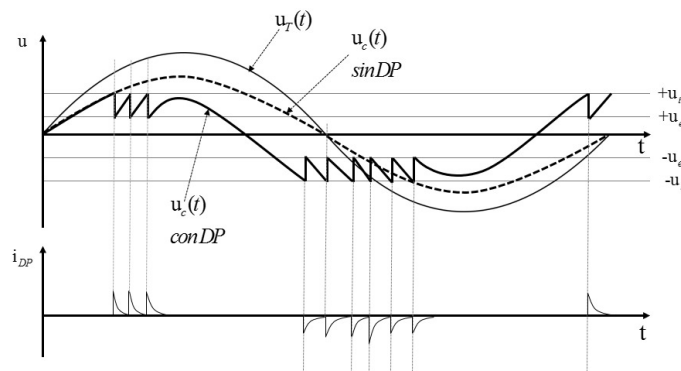
2.3.1. Descargas parciales

En general, las descargas parciales (abreviado como *DP*) son la consecuencia de una concentración de estrés ya sea dentro del aislante o en su superficie al provocar un puente entre el aislante y el conductor, generando descargas eléctricas localizadas [15]. Las DPs pueden producirse en diferentes tipos de aislantes como sólidos, líquidos o gases, provocando un deterioro en el lugar de ocurrencia; sin embargo, son difíciles de predecir por lo cual se producen en diferentes ubicaciones y medios siendo de difícil localización.

En los aislamientos las descargas parciales se producen principalmente por pequeñas burbujas en líquidos, vacuolas de gas en dieléctricos sólidos, grietas entre estratos, etc [16]. Otros factores para la producción de estas descargas son la presencia de impurezas, contaminación, humedad o esfuerzos mecánicos, como impactos o vibraciones.

Las vacuolas son cavidades comúnmente llenas de aire que se encuentran en el interior o en la superficie de los aislantes. La presencia de estas imperfecciones puede dar lugar a campos eléctricos diversos, que a su vez, provocan la ionización de las moléculas del aire y generan descargas parciales. Las descargas parciales que ocurren en el interior de una vacuola surgen cuando la ionización de moléculas se convierte en una avalancha de electrones. Esto se debe a que la tensión dentro de la vacuola (V_c) supera la tensión de ignición (V_i) y cesa cuando V_c desciende por debajo de la tensión de extinción (V_e). Este fenómeno se repite tanto en el semiciclo positivo como en el negativo, generando descargas parciales en forma de pulsos de corriente, como se ilustra en la Figura 2.3. La intensidad, duración y ángulo de fase de los pulsos de corriente varían en función del tamaño, cantidad y del gas atrapado en la vacuola.

Figura 2.3: Comportamiento de tensión y corriente ante una DP.



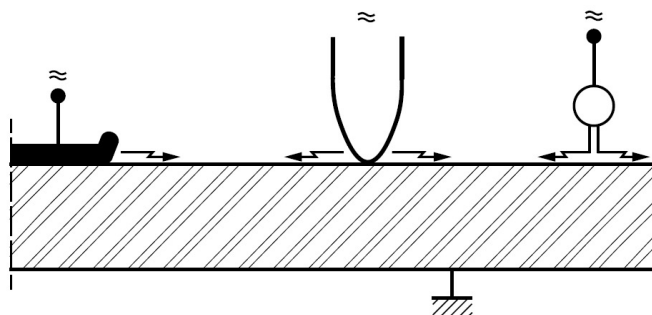
Fuente: Influencia de la frecuencia de integración de la carga aparente y de la impedancia de detección en la medición de descargas parciales [16].

Las descargas parciales se pueden agrupar en descargas de tipo superficial, internas y corona.

2.3.1.a. Descargas parciales superficiales

Las descargas parciales superficiales se producen principalmente debido a la contaminación superficial del material aislante. Este tipo de descarga aparece producto de las componentes tangenciales de los campos eléctricos; el campo recorre la superficie del aislador hasta encontrar un punto débil. Las descargas parciales superficiales tienen la particularidad de que se pueden evitar, en su mayoría, mediante una mantención rutinaria al aislador o también, al escoger un aislador que permita la limpieza natural del aislante haciendo uso de las condiciones ambientales, y a su vez, disminuyendo la acumulación de la contaminación en este [17].

Figura 2.4: Descargas parciales superficiales.

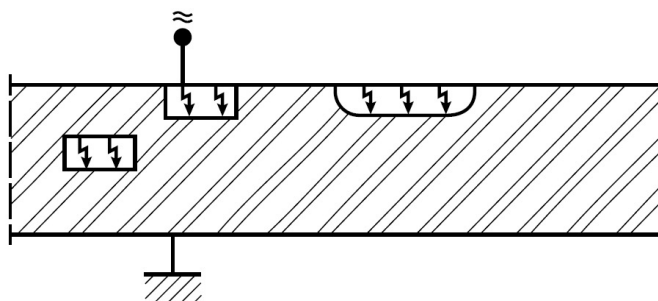


Fuente: Influencia de la frecuencia de integración de la carga aparente y de la impedancia de detección en la medición de descargas parciales [16].

2.3.1.b. Descargas parciales internas

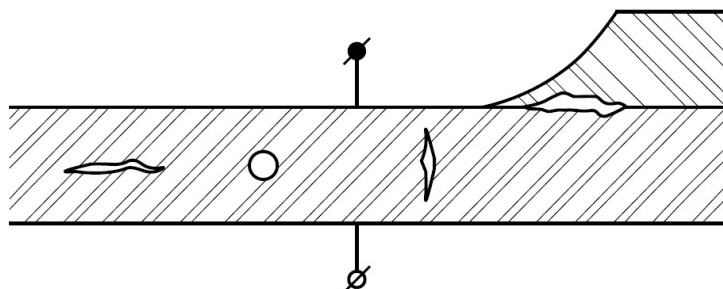
Las descargas parciales debido a imperfecciones en dieléctricos sólidos, líquidos aislantes o gas comprimido son clasificadas como internas. Este tipo de DP depende de la geometría del defecto, ubicación y del estrés (mecánico, térmico o eléctrico) al que el aislante es sometido. En aislantes sólidos, las descargas pueden producirse en cavidades llenas de gas como grietas o huecos. Mientras que en aislantes líquidos pueden surgir descargas en burbujas producto de fenómenos térmicos o eléctricos y en vapor de agua de regiones sometidas a un alto campo eléctrico. Estas descargas que generan un envejecimiento progresivo del material aislante se denominan como irreversibles [16].

Figura 2.5: Descarga parcial del tipo interna con ubicación variada.



Fuente: Influencia de la frecuencia de integración de la carga aparente y de la impedancia de detección en la medición de descargas parciales [16].

Figura 2.6: Geometrías varias de defectos de DPs internas.



Fuente: Influencia de la frecuencia de integración de la carga aparente y de la impedancia de detección en la medición de descargas parciales [16].

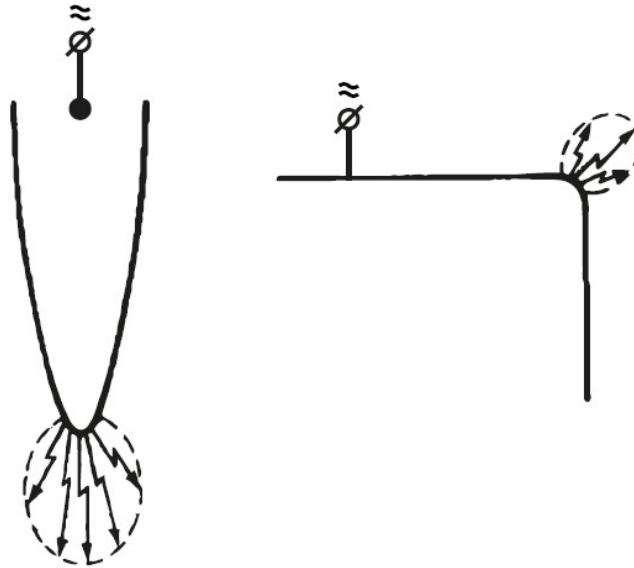
La permeabilidad en estas cavidades o vacuolas es menor que la del material circundante, lo que conduce a que la corriente elija el camino de menor resistencia. Como consecuencia, surgen cargas distribuidas en las vacuolas, generando un campo eléctrico interno con polaridad opuesta al campo externo generado en el aislador debido a la tensión que lo alimenta. Sin embargo, al aplicarse una tensión alterna, la carga atraviesa el cero e invierte su polaridad, provocando que en un intervalo de tiempo ambas cargas compartan la misma polaridad, resultando en la suma de los campos eléctricos. Esta coincidencia temporal aumenta la probabilidad de una descarga parcial [17].

2.3.1.c. Descargas parciales tipo corona

Las descargas parciales tipo corona ocurren en dieléctricos gaseosos, donde el campo eléctrico que se genera por la alimentación no es homogéneo; esto se da por la geometría del dieléctrico que concentra un mayor campo eléctrico en algún punto, ocurriendo principalmente en electrodos puntiagudos. El aire se ioniza de distintas formas dependiendo del tipo de polaridad y alimentación. Para una alimentación DC, la descarga parcial posee un comportamiento para una polaridad positiva y negativa. Para una alimentación continua de polaridad positiva, los electrones se acumulan en la punta, mientras que los iones negativos se posicionan en el electrodo de menor potencial. Para una alimentación DC de polaridad negativa, los electrones quieren concentrarse en la punta, por lo que se necesitará una mayor tensión para generar la descarga parcial, puesto que la distancia que

tienen que recorrer los electrones es mayor [17].

Figura 2.7: Descarga del tipo corona.



Fuente: Influencia de la frecuencia de integración de la carga aparente y de la impedancia de detección en la medición de descargas parciales [16].

A diferencia de la alimentación en corriente continua, la alimentación mediante corriente alterna (AC) genera variaciones en las tensiones de ionización debido a los constantes cambios de polaridad. Estas alteraciones se ven influenciadas por la carga espacial remanente del semiciclo anterior. Es posible encontrar descargas parciales en ambos semiplanos, sin embargo, es más frecuente encontrarlas durante el semiciclo negativo [17].

2.3.2. Descargas tipo impulso

Los ensayos de impulso han sido una herramienta clave para evaluar la resistencia dieléctrica de los aceites aislantes, especialmente al simular condiciones extremas como descargas atmosféricas y sobretensiones transitorias [18]. Durante estos ensayos, se aplica una onda de impulso estandarizada ($1,2/50[\mu s]$) para observar cómo el material responde bajo estas tensiones críticas. En general, la presencia de defectos internos o impurezas puede provocar que el campo eléctrico local supere la rigidez dieléctrica, lo que desencadena descargas parciales y, en casos severos, descargas disruptivas totales [19].

Además, la estadística de fallos en ensayos de impulso puede describirse mediante la distribución de Weibull, cuya función de probabilidad acumulada está dada por:

$$P(q) = 1 - e^{-\left(\frac{q}{\alpha}\right)^\beta} \quad (2.1)$$

Donde:

- α es la magnitud de descarga que han alcanzado el 63,2% de los pulsos. Se puede despreciar cuando β es muy pequeño.

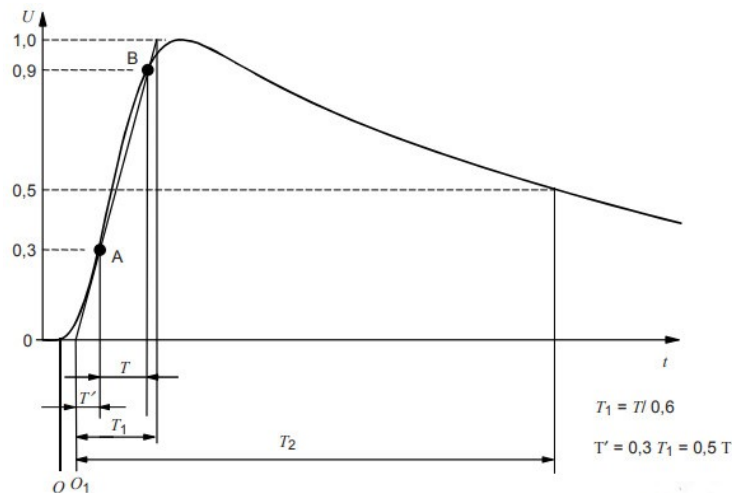
- β mide la variabilidad de las magnitudes máximas y mínimas de las DPs. Si es menor a dos se considera un pequeño valor, y se asociará a una alta variabilidad, es decir, existe gran diferencia entre la mínima magnitud de DPs y la máxima detectada en el ensayo.

Estudios recientes han demostrado que la incorporación de nanopartículas en aceites aislantes mejora significativamente su resistencia a descargas durante ensayos de impulso. Las nanopartículas actúan como trampas de electrones, redistribuyen el campo eléctrico y mitigan la formación de DP, lo que resulta en una mayor rigidez dieléctrica y una menor probabilidad de fallo [20]. Aunque los ensayos realizados en este estudio no incluyeron mediciones directas de DP, los resultados obtenidos permiten inferir la robustez dieléctrica del material y su comportamiento bajo condiciones extremas, lo que es crucial para su aplicación en sistemas de alta tensión.

2.3.2.a. Ensayos de Impulso Tipo Rayo

La norma define el impulso tipo rayo como una onda de tensión unidireccional que se caracteriza por un rápido ascenso a su valor máximo (frente de onda) seguido de una caída más lenta (cola de onda). La forma de onda estándar cuenta con el tiempo de frente de onda de $1,2[\mu s]$, definido como el intervalo entre el 10 % y el 90 % del valor máximo de la tensión y el tiempo de cola de onda de $50[\mu s]$, definido como el intervalo entre el inicio del impulso y el momento en que la tensión cae al 50 % del valor máximo.

Figura 2.8: Curva general de un impulso tipo rayo



Fuente: High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements [18].

En la Figura 2.8 se presenta la forma de onda del ensayo tipo rayo con sus parámetros. Además, la norma IEC-60060 establece desviaciones inferiores al $\pm 30\%$ y $\pm 20\%$ para los valores de T_1 y T_2 respectivamente, además de una desviación de amplitud inferior al $\pm 3\%$.

Donde:

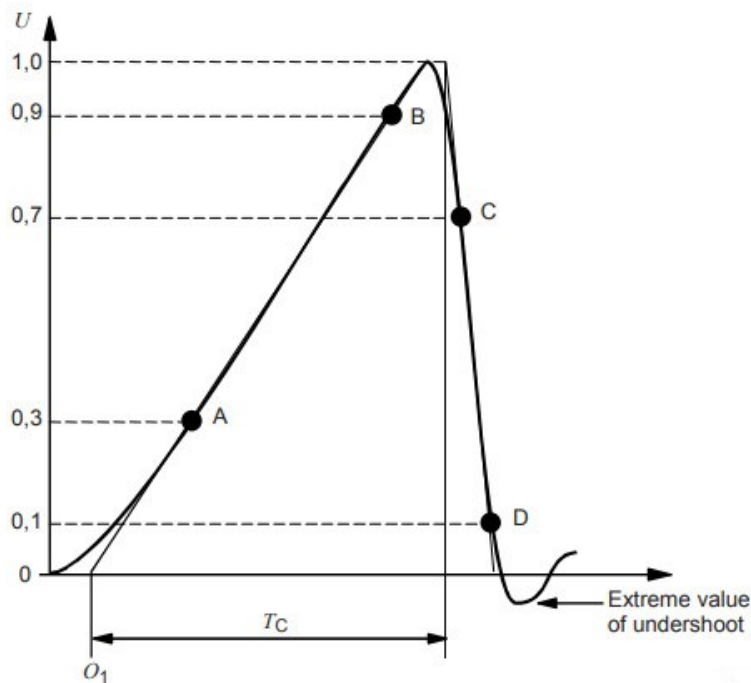
- A : 30% del valor peak de la señal durante el frente.

- B : 90 % del valor peak de la señal durante el frente.
- C : Punto donde la curva de tensión ha disminuido hasta el 50 % del valor peak.
- O : Origen o inicio de la señal.
- O_1 : Origen virtual, donde la recta AB corta al eje x .
- T : Intervalo entre los instantes de los puntos A y B .
- T_1 : Se calcula como 1,67 veces el intervalo entre los instantes de los puntos A y B .
- T_2 : Intervalo de tiempo entre origen virtual y el punto C .

En este ensayo, se derivan dos tipos de ensayos dependiendo del lugar de ocurrencia del corte en la señal:

Ensayo tipo rayo cortado en el frente : Su nombre radica en que, durante el frente, es decir, antes de T_1 , se cortocircuita el condensador generando una descarga brusca como ocurre en el transitorio de la Figura 2.9.

Figura 2.9: Impulso Tipo Rayo de frente cortado.



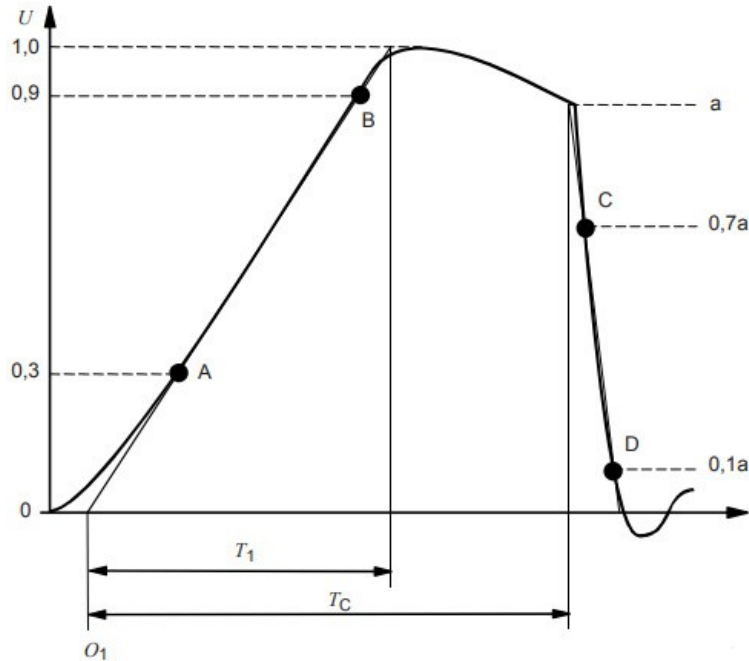
Fuente: High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements [18].

Donde T_c corresponde al intervalo de tiempo entre el origen virtual y el valor máximo de subida antes del corte.

Ensayo tipo rayo cortado en al cola : Su nombre radica en que la descarga del capacitor ocurre después de T_1 se cortocircuita el condensador para generar una descarga

brusca generando que la tensión caiga rápidamente como ocurre en el transitorio presentado en la Figura 2.10.

Figura 2.10: Impulso Tipo Rayo de cola cortada.



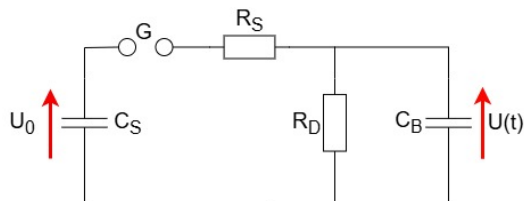
Fuente: High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements [18].

Donde:

- C : 70% del valor peak de la señal durante la cola.
- D : 10% del valor peak de la señal durante la cola.
- T_c : Intervalo entre el origen virtual y el instante de picada.
- α : Valor a partir del cual se corta la cola.

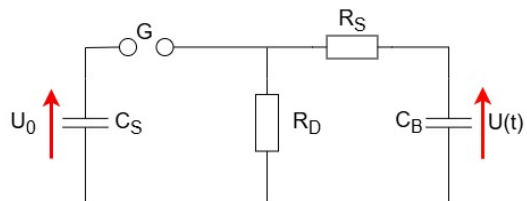
2.3.2.b. Circuito generador de tipo impulso

Figura 2.11: Circuito generador de impulso con resistencia en serie.



Fuente: Introduction to High Voltage Experiments [21].

Figura 2.12: Circuito generador de impulso con resistencia en paralelo.



Fuente: Introduction to High Voltage Experiments [21].

Los circuitos típicos de generación de impulso se componen de una fuente de alta tensión continua, un condensador de carga C_B , una resistencia de frente R_S , un condensador de descarga C_S y una resistencia de cola R_e . El condensador de carga C_B es el encargado de almacenar energía y elevar la tensión $U(t)$ hasta un valor tal que provoque la ruptura en las esferas y genere el impulso deseado. La resistencia de frente R_S , será la que determine el tiempo de frente T_1 , mientras que la resistencia R_e , determina el tiempo de cola T_2 . En el caso de la Figura 2.11 el tiempo de frente lo determina la resistencia R_D , mientras que para el circuito de la Figura 2.12 la resistencia de cola lo determina la suma de la resistencia R_S y R_D . Por lo tanto, al presentar una mayor resistencia, la descarga presentará un mayor tiempo de duración.

2.3.3. Rigidez Dieléctrica

El ensayo de rigidez dieléctrica es una prueba fundamental para evaluar la capacidad de los materiales aislantes de resistir el paso de corriente eléctrica sin sufrir una ruptura. En el caso de líquidos aislantes empleados en transformadores de potencia, este ensayo determina la tensión máxima soportada antes de que ocurra un colapso dieléctrico. La norma *IEC-60156* especifica un procedimiento estándar bajo tensión alterna, utilizando configuraciones definidas de electrodos y distancias precisas para garantizar resultados reproducibles [22]. En este contexto, la rigidez dieléctrica se define como el voltaje máximo que puede soportar el aceite sin fallar, un parámetro crucial para la seguridad y eficiencia del equipo eléctrico [23]. Comprender los factores que afectan la rigidez dieléctrica permite optimizar el diseño y la seguridad de los sistemas de aislamiento eléctrico, contribuyendo al desarrollo de soluciones más eficientes y sostenibles en la industria de la energía.

La *IEC-60156* permite la opción de agitar el aceite durante la prueba usando un agitador magnético, técnica aplicable para aceites refrigerantes, pero no para aceites estáticos. Las tensiones de ruptura alcanzan hasta $75[kV]$ a $20 \pm 5 \text{ }^\circ C$, utilizando electrodos esféricos o semiesféricos con una distancia de $2,5 \pm 0,05[mm]$. Las especificaciones incluyen limpieza rigurosa del recipiente y electrodos para evitar contaminación. El procedimiento incrementa el campo eléctrico hasta que se produce la ruptura [24][22].

El fenómeno de ruptura dieléctrica depende de la distribución del campo eléctrico y las propiedades del medio. En aislamientos compuestos como aceite-papel, la permitividad y resistividad diferenciales generan distorsiones de campo, afectando el comportamiento dieléctrico [25]. Estudios recientes sobre nanofluidos muestran que la adición de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) mejora hasta un 50 % la rigidez dieléctrica respecto al aceite base [26, 23]. Las nanopartículas atrapan electrones rápidos, reduciendo su movilidad y mitigando la formación de *streamers*, mecanismo clave para aumentar la resistencia dieléctrica. La mejora relativa se expresa según la ecuación 2.2:

$$\text{Mejora (\%)} = \left(\frac{\text{BDV del nanofluido}}{\text{BDV del aceite base}} - 1 \right) \times 100 \quad (2.2)$$

Comprender los factores que influyen en la rigidez dieléctrica permite optimizar el diseño de sistemas aislantes, contribuyendo a soluciones sostenibles y seguras en la industria eléctrica [27].

2.3.4. Detección de gases disueltos

La detección de gases en el aceite aislante de transformadores es fundamental para identificar fallos. Cuando se generan fallos como sobrecarga, sobrecalentamiento, descargas parciales, chispas de baja energía y arcos en el sistema de aislamiento, comienzan una serie de procesos de descomposición de hidrocarburos que producen la ruptura de los enlaces químicos entre los átomos, formando radicales libres, los cuales se recombinan posteriormente formando diferentes tipos de gases como H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 y C_2H_2 [28][29].

El tipo y la concentración de estos gases proporcionan información valiosa sobre el estado del transformador, lo que convierte al análisis de gases disueltos (DGA por sus siglas en inglés) en una herramienta confiable para el diagnóstico temprano de fallos, siendo ampliamente utilizado en los procesos de mantenimiento predictivo. Cuando ocurren fallas térmicas o eléctricas, los sistemas de aislamiento líquido experimentan un proceso de descomposición lenta, acompañado de reacciones químicas complejas que generan diversos gases. Estos gases se disuelven total o parcialmente en el aceite, reduciendo sus propiedades dieléctricas y comprometiendo el rendimiento del transformador [28][29].

Según la norma *IEC-60599*, los fallos posibles se pueden clasificar en los siguientes tipos [30]:

- Descargas parciales (PD): De tipo plasma frío (corona), pueden generar una posible descomposición en el aislamiento de papel o causar perforaciones carbonizadas (difíciles de detectar). También está el tipo chispa, que generan perforaciones carbonizadas en el papel o carbonización superficial.
- Descargas de baja energía (D1): Evidenciadas por perforaciones carbonizadas más grandes en el papel, carbonización superficial o partículas de carbono en el aceite.
- Descargas de alta energía (D2): Causan destrucción extensiva y carbonización del papel, fusión de metal en los extremos de la descarga, carbonización en el aceite y, en algunos casos, disparo del equipo debido a corrientes elevadas.
- T1: Temperaturas menores a $300^\circ C$, con papel marrón.
- T2: Temperaturas mayores a $300^\circ C$, con papel carbonizado.
- T3: Temperaturas sobre $700^\circ C$, con carbonización del aceite, decoloración del metal ($800^\circ C$) o fusión del metal (mayor a $1000^\circ C$).

En base a los ensayos realizados, los fallos detectados en el aceite se clasifican principalmente en descargas parciales (PD), descargas de baja energía (D1) y descargas de alta energía (D2), los cuales se identifican a partir de las concentraciones de gases obtenidas en el análisis.

Para el proceso de análisis de detección de gases se utiliza el equipo E-Nose (Nariz Electrónica). La nariz electrónica es un dispositivo que detecta y analiza compuestos volátiles mediante una matriz de sensores de gas (óxido metálico, polímeros conductores, QCM, SAW) y sistemas de reconocimiento de patrones (redes neuronales, lógica difusa). En este caso, la E-Nose incluye sensores para H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , humedad y temperatura. Cada

sensor se calibra ajustando voltajes, verificando repetibilidad y registrando respuestas a concentraciones específicas de gases, preparadas según fallos típicos en transformadores. La E-Nose utiliza sensores catalíticos para detectar gases liberados durante la degradación del papel aislante y descargas parciales en transformadores. Las respuestas de los sensores permiten identificar el tipo de fallo mediante análisis de patrones [28][29].

El sistema E-Nose está diseñado para medir gases disueltos en aceites dieléctricos utilizando una matriz de sensores de gas de bajo costo. El sistema consta de cuatro etapas principales que se ejecutan secuencialmente [28]:

1. Limpieza y extracción de gases en la cámara de medición: La cámara de medición está hecha de PTFE (politetrafluoroetileno) y es hermética para evitar contaminación externa. Un ventilador en la cámara asegura la homogeneización de los gases. Se utiliza aire seco para limpiar la cámara y estabilizar los sensores antes de cada medición.
2. Extracción e inyección de gases disueltos: Los gases se extraen de muestras de aceite contaminado mediante un proceso de agitación y calentamiento a $70^{\circ}C$. Los gases extraídos se inyectan en la cámara de medición utilizando una jeringa hermética y un dispositivo de inyección controlado por un motor DC.
3. Medición y adquisición de gases capturados: Se utiliza una matriz de 8 sensores de óxido metálico (MOS) para detectar los gases. Los sensores incluyen modelos como *TGS2600*, *TGS2611*, *TGS2620*, *MQ8*, entre otros. Cada sensor se calibra y precalienta antes de su uso para asegurar respuestas estables. Los sensores reaccionan a gases como H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 y C_2H_2 , entre otros.
4. Procesamiento, extracción y visualización de parámetros característicos: La respuesta de los sensores se mide como la diferencia entre el voltaje máximo (V_{max}) y el voltaje inicial (V_0). Se utiliza análisis de componentes principales (PCA) para reducir la dimensionalidad de los datos y facilitar la interpretación.

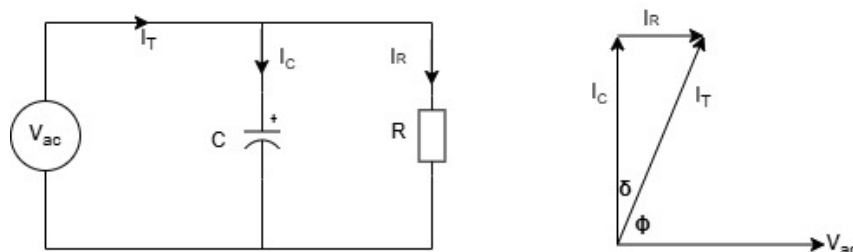
2.3.5. Tangente delta

El ensayo de tangente delta, también conocido como Factor de disipación (FD) o Factor de pérdida (FP), mide las propiedades dieléctricas de un material basado en la relación entre la corriente resistiva y la corriente capacitiva de un material cuando es sometido a un campo eléctrico. En términos más simples, mide cuánta energía se pierde en forma de calor debido a pérdidas dieléctricas de un aislante [31][19].

Este ensayo evalúa la calidad del material aislante como transformadores, cables, líquidos, etc. Se realiza para detectar posibles defectos en los materiales aislantes que puedan comprometer la seguridad y eficiencia de los equipos eléctricos. A través de esta prueba, se puede prever la degradación del aislamiento debido a factores como humedad, contaminación o envejecimiento. Esto es crucial para prevenir fallos eléctricos, que pueden resultar en costosos daños a los equipos o interrupciones del servicio eléctrico. El ensayo consiste en aplicar una tensión alterna al material aislante bajo prueba y medir la corriente resultante. Posteriormente, se calcula el ángulo de fase entre la tensión y la corriente, lo que permite determinar la tangente delta. El equipo de medición suele incluir un puente dieléctrico y un medidor de tangente delta, con el cual se puede evaluar la relación entre la corriente

capacitiva y la corriente resistiva. Generalmente, las pruebas se realizan bajo condiciones controladas de temperatura y humedad para asegurar resultados precisos [31][19].

Figura 2.13: Relación de corriente resistiva y capacitiva para tangente delta.



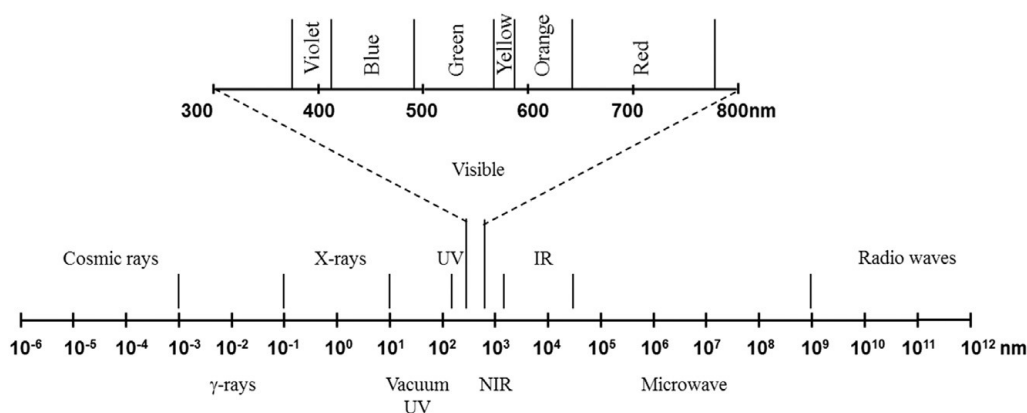
Fuente: Elaboración propia.

Un FD bajo indica que el material presenta buenas propiedades aislantes, siendo el caso contrario un indicio de pérdidas de energía y posibles problemas en la eficiencia del aislamiento[31].

2.3.6. Espectroscopía UV-Visible

La espectroscopía UV-Visible es una técnica analítica utilizada para medir la absorbancia de luz en las regiones ultravioleta y visible del espectro electromagnético (aproximadamente entre 200 y 800[*nm*]). Esta técnica mide la cantidad de luz absorbida por una sustancia en función de la longitud de onda, lo que permite obtener un espectro de absorbancia. Este espectro proporciona información sobre la estructura electrónica de las moléculas y puede ayudar a identificar o cuantificar la concentración de compuestos en una muestra [32][33].

Figura 2.14: Espectro electromagnético a lo largo de las longitudes de onda.



Fuente: UV-VISIBLE Spectrophotometry of Waters and Soils [33].

La técnica se utiliza para analizar compuestos, ya que la cantidad de luz absorbida por una sustancia está relacionada con su estructura química. Permite obtener información cualitativa y cuantitativa sobre la composición de una muestra, determinando la presencia

de compuestos y su concentración, lo que es crucial en análisis químicos, biológicos y ambientales[32] [33].

La Ecuación (2.3) se conoce como la ley de *Beer-Lambert*, es una fórmula fundamental de la espectroscopía UV-Visible y describe cómo la luz es absorbida por una solución [32].

$$A = \epsilon \cdot b \cdot C \quad (2.3)$$

Donde:

- A es la absorbancia y es una unidad adimensional.
- ϵ es la absorptividad molar [$M^{-1} \cdot cm^{-1}$], que varía dependiendo del material y la longitud de onda.
- b es la longitud del camino óptico a través de la muestra [cm].
- C es la concentración de la solución [$mol \cdot L^{-1}$]

La muestra se expone a luz UV-Visible y se mide la absorbancia a distintas longitudes de onda. Un espectrofotómetro UV-Visible cuenta con una fuente de luz, una muestra y un detector que mide la luz transmitida. Además, la técnica puede incluir la preparación de curvas de calibración con concentraciones conocidas para la cuantificación de compuestos. Para obtener una curva de calibración, se preparan varias soluciones estándar de concentraciones conocidas del compuesto de interés y se mide su absorbancia. Estos datos se grafican y se ajusta una línea que sigue la fórmula de la ley de *Beer-Lambert*. El coeficiente de correlación (R^2) de esta línea debe ser cercano a 1 para asegurar una calibración precisa [32].

La espectroscopía UV-Visible se utiliza en la investigación científica, el control de calidad industrial, el monitoreo ambiental (por ejemplo, en el análisis de la calidad del agua y el suelo) y en la química clínica. Además, esta técnica se emplea en una variedad de campos, como la industria farmacéutica, la biotecnología y la química analítica [32][33].

Capítulo 3

Montaje experimental y materiales

3.1. Síntesis de nanopartículas

Los compuestos utilizados para la síntesis de las nanopartículas de cromo fueron: nitrato de cromo ($C_rN_3O_9$), ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$) y el hidróxido de sodio (N_aOH).

El método utilizado para la síntesis de nanopartículas se denomina como *método hidrotérmal*, el cual utiliza la aproximación *bottom-up*. La síntesis hidrotérmal implica reacciones en medio acuoso a temperaturas superiores a $100^\circ C$ y presiones mayores de 1 bar, facilitando la disolución de sustancias poco solubles. A altas temperaturas, el agua actúa como ácido y base fuertes, promoviendo reacciones agresivas. Además, se añaden mineralizadores que refuerzan esta capacidad. El agua también puede funcionar como agente reductor, cambiando los estados de oxidación de los compuestos. También se usan plantillas como el tetrametilamonio (TMA) para controlar la porosidad de las estructuras nanométricas sintetizadas [11]. Para la preparación de las nanopartículas se siguieron los siguientes pasos:

1. Se agrega 4[g] de $C_rN_3O_9 \times 9H_2O$ en 100[ml] de agua desionizada dentro de un baso precipitado y se agita hasta disolver.
2. Se agregan 5[g] de $C_6H_8O_6$ a la mezcla anterior y se agitan por 30 minutos.
3. Se agregan 8[g] de N_aOH y se agita por 1 hora.
4. Calentar bajo presión al horno a $150^\circ C$ por 10 horas.

A continuación, el producto obtenido se lavó varias veces con agua desionizada para eliminar los subproductos orgánicos o inorgánicos solubles en agua (Figura 3.1). La muestra obtenida se liofilizó en un liofilizador, lo que dio lugar a una muestra de polvo, y se utilizó para caracterizaciones adicionales.

Figura 3.1: Solución resultante al seguir proceso de preparación de nanopartículas.



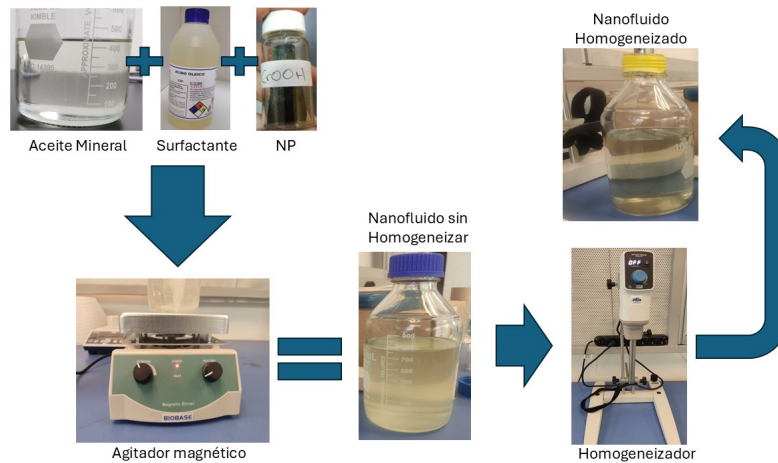
Fuente: Elaboración propia.

La caracterización morfológica se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) un microscopio electrónico *Zeiss* de 30[kV] y por microscopía electrónica de transmisión (TEM) en el equipo *Hitachi Model HT7700* de 120[kV].

3.2. Síntesis del nanofluido

La creación del nanofluido contempla tres elementos utilizados: el fluido base del nanofluido, que en este caso es aceite mineral para transformadores de potencia, el ácido oleico, que actúa como surfactante, y las NPs de *CrOOH* utilizadas en distintas concentraciones.

Para la sintetización del nanofluido se sigue el *método de dos pasos*, donde el primer paso, que es la síntesis de las nanopartículas, ya fue hecho mediante la técnica hidrotermal y explicado en la Sección 3.1. El segundo paso es la mezcla de los componentes del nanofluido y la dispersión de las nanopartículas; para comenzar, se mezclan el aceite y el surfactante, el cual se encarga de la estabilización del fluido y las nanopartículas, disminuyendo la posibilidad de aglomeración y coagulación de las NPs [34]. Luego se agregan las nanopartículas en la proporción deseada, agitando constantemente por 30 minutos con un agitador magnético para que la solución final se mezcle completamente. Además, para asegurarnos de la dispersión, se homogeniza la mezcla con un homogenizador (*VELP* modelo *OV625*) durante 45 minutos [35]. Tras la homogeneización, la solución se cubre de forma segura y no se altera durante un día [35].

Figura 3.2: Proceso utilizado para la creación de nanofluido aceite/ $CrOOH$.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Rigidez Dieléctrica

El equipo utilizado para el ensayo de rigidez dieléctrica es *BAUR Oil Tester DPA*, el cual puede ser configurado para que siga normas como la *ASTM D1816* o la *ASTM D877*; sin embargo, por parte de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), se define un único método para la prueba de voltaje de ruptura dieléctrica de aceites, la norma *IEC-60156*. En base a lo dictado en la norma, se aumenta la tensión en los electrodos de manera automática hasta producir la ruptura en el aceite o el nanofluido, registrando el voltaje de ocurrencia. Son 6 la cantidad de rupturas que se generan en el fluido a ensayar según la norma especificada, con un lapso temporal de dos minutos entre la ruptura y el inicio de la siguiente medición eléctrica. Al terminar este proceso, se genera un informe con las tensiones de ruptura que alcanza el fluido, el promedio y la desviación estándar del conjunto de mediciones.

Figura 3.3: Equipo *BAUR* utilizado en ensayo Rigidez dieléctrica

Fuente: Elaboración propia.

Si bien, el equipo contiene en su interior el circuito necesario para la correcta utilización de la norma elegida, se debe tener en cuenta las características de la norma.

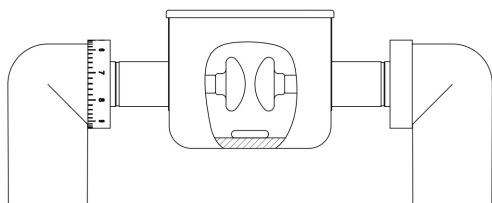
Tabla 3.1: Dimensiones de electrodos en base a norma *IEC-60156*.

| Tipo de Electrodo | Dimensiones [mm] | Distancia entre Electrodos [mm] | Tensión de Ensayo (Incremento) [kV/s] |
|-------------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Esférico | Diámetro: 12,5 a 13,0 | $2,5 \pm 0,05$ | $2,0 \pm 0,2$ |
| Parcialmente | Radio: $25 \pm 0,25$ | | |
| Esférico | Diámetro: 36 | | |

Fuente: Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method [22].

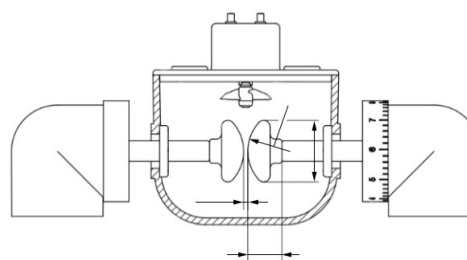
Como este método se rige por la norma *IEC-60156*, se permite la opción de agitar el aceite durante la prueba, usando un agitador magnético. Esta agitación puede ser necesaria en aceites refrigerantes, pero no en aceites estáticos como en interruptores.

Figura 3.4: Objeto de ensayo sin agitador.



Fuente: Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method [22].

Figura 3.5: Objeto de ensayo con agitador.



Fuente: Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method [22].

Debido a la ausencia de interrupciones externas significativas durante el ensayo, el vertimiento del líquido y la limpieza del recipiente de ensayo en el *BAUR* adquieren una importancia crucial. Para limpiar el objeto de ensayo, se vierte una parte del fluido y se distribuye sobre las paredes del recipiente con el objetivo de eliminar todas las impurezas al entrar en contacto con el aceite. Este procedimiento se repite una segunda vez y, posteriormente, se introduce el aceite sin burbujas en el recipiente hasta cubrir por completo los electrodos con el fluido.

Además, cada vez que se desee utilizar un nuevo fluido, el recipiente y los electrodos deben limpiarse conforme a lo establecido en la norma. Adicionalmente, es necesario realizar 24 rupturas previas para calibrar el equipo antes de proceder con el ensayo [22].

3.4. UV-Visible

El equipo a utilizar es el *Espectrofotómetro Orion AquaMate 7100 Vis*, el cual mediante ondas de luz a distintas frecuencias determina la absorbancia de la muestra. La muestra debe utilizarse en viales de vidrio que se encuentren sin ningún tipo de mancha o impurezas que puedan obstruir el paso de la onda al receptor, alterando el resultado y el espectro de

absorbancia y longitud de onda.

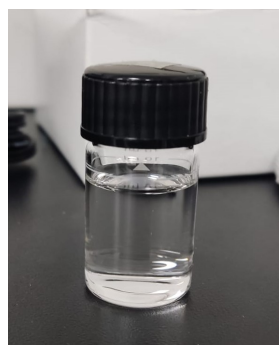
Figura 3.6: Equipo utilizado en ensayo estrocospía visible.



Fuente: Elaboración propia.

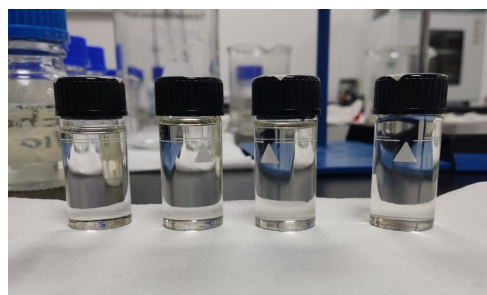
Se necesitará una referencia en blanco al comienzo del análisis; esta referencia puede ser de disolvente. En este proceso se utiliza hexano para la referencia en blanco. Las soluciones de calibración deben realizarse con precisión. Si las soluciones no se hacen con la suficiente precisión, no se determinará la concentración real de la muestra en cuestión de manera precisa.

Figura 3.7: Referencia blanco con hexano.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.8: Muestras de aceite y nanofluidos utilizados.



Fuente: Elaboración propia.

Cada disolvente tiene una longitud de onda de corte de absorbancia UV-Vis. El punto de corte del disolvente es la longitud de onda por debajo de la cual el propio disolvente absorbe toda la luz. Entonces, al elegir un solvente, se debe tener en cuenta su corte de absorbancia y dónde se cree que el compuesto bajo investigación absorbe. Si están cerca, elija un solvente diferente.

El material del que está hecha la cubeta (el portamuestras) también tendrá un corte de absorbancia UV-Vis. El vidrio absorberá toda la luz mayor en energía comenzando en aproximadamente $300[nm]$, por lo que si la muestra absorbe en la UV, una cubeta de cuarzo será más práctica ya que el corte de absorbancia es de alrededor de $160[nm]$ para el cuarzo [32].

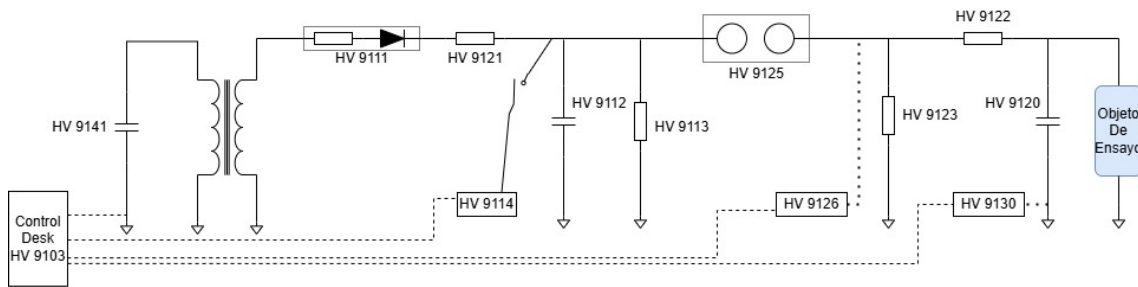
3.5. Montaje Impulso

Los materiales requeridos para realizar esta experiencia son los presentados a continuación [21].

- Rectificador de silicio, HV 9111 de $100[k\Omega]$.
- Resistencia de carga, HV 9121 de $10[M\Omega]$.
- Resistencia de medición, HV 9113 de $280[M\Omega]$.
- Condensador Impulso, HV 9112 de $25[nF]$.
- Varilla conexión, HV 9108.
- Varilla Aislante, HV 9124.
- Condensador de medida, HV 9141 de $100[pF]$.
- Mesa de control, HV 9104.
- HV transformador, HV 9105 de $220/110000[V]$.
- Gap de esferas, HV 9125.
- Controlador de distancias de esferas HV 9126.
- Condensador de carga, HV 9120 de $1,2[nF]$.
- Resistencia de frente de onda, HV 9122 de $350[\Omega]$.
- Resistencia de cola de onda, HV 9123 de $2800[\Omega]$.
- Connecting cup, HV 9109.
- Pedestal de piso, HV 9110.
- Varilla de puesta a tierra, HV 9107.
- Voltímetro de peak de impulso, HV 9152.
- Divisor de baja tensión, HV 9130 de $507,33[nF]$.
- Seccionador de puesta a tierra HV 9114.

El circuito generador de impulsos utilizado para el ensayo es el mostrado en la Figura 2.12 considerando los elementos HV 9122 como la resistencia de frente R_S con un valor de $350[\Omega]$, el elemento HV 9120 como el capacitor de carga C_B de valor de $1,2[nF]$, el capacitor de carga HV 9112 como el capacitor de carga C_S de valor $25[nF]$ y como la resistencia de cola la resistencia HV 9123 con un valor total de $2800[\Omega]$, cabe recordar que las resistencias determinan los tiempos de cola y de frente respectivamente.

Figura 3.9: Circuito para ensayos de tipo impulso.

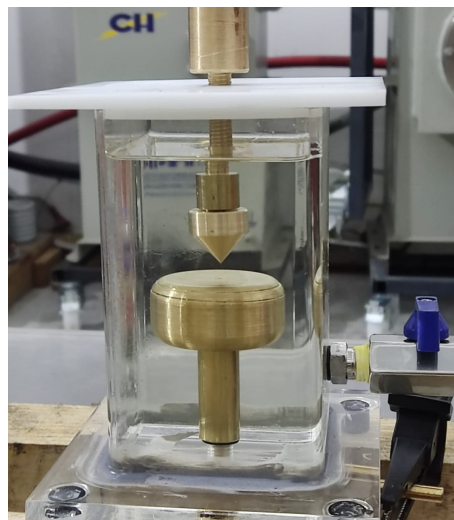


Fuente: Elaboración propia.

Una vez montado el circuito experimental mostrado en la Figura 3.9, se sube la tensión del transformador de manera paulatina y controlada hasta los $60[kV]$ aproximadamente, y con ello obtener una tensión controlada en el condensador de carga en base al tipo de aislante a utilizar. La generación de la tensión controlada se produce mediante la activación de una descarga accionada mediante fibra óptica desde la mesa de control HV 9104 activando la bujía interna de los explosores HV 9125 generando una descarga. La generación de esta ruptura depende de la tensión y la distancia entre las esferas (explosores HV 0125) la cual se modificó en base al fluido aislante, permitiendo generar los impulsos.

Por otro lado, se tienen los elementos HV 9111 los cuales son rectificadores que generan un flujo unidireccional de corriente en el secundario del transformador, y también el elemento HV 9121 que actúa como resistencia de carga. Además, se tiene el elemento HV 9130 que corresponde a un divisor de tensión conectado a la mesa de control y con ella poder determinar la tensión de ruptura. De manera previa, es necesario tener el osciloscopio calibrado en la escala de tiempo, amplitud y trigger para la correcta visualización de la señal.

Figura 3.10: Recipiente de aislante líquido (objeto de ensayo) para ensayo de impulso.



Fuente: Elaboración propia.

El objeto de ensayo de la Figura 3.10 consta de un electrodo cónico y uno plano,

conformando un objeto punta-plano, a una distancia de $1[mm]$, donde se ensayan los fluidos aislantes para verificar las tensiones de ruptura.

3.6. Tangente delta

El ensayo efectuado se rige según la norma *ASTM D924*, de la cual establece el procedimiento para medir la constante dieléctrica (permitividad relativa) y la tangente de pérdida dieléctrica en líquidos aislantes eléctricos utilizados en equipos como transformadores. El ensayo emplea una celda de medición con dos electrodos, una fuente de tensión sinusoidal (hasta $2[kV]$) y un puente de medición, bajo condiciones controladas de temperatura. Estos parámetros permiten evaluar la calidad del líquido, detectando contaminación o envejecimiento. Un buen líquido aislante debe tener baja polarización dieléctrica, asegurando mínimas pérdidas de energía y buen desempeño eléctrico.

El objeto de medición que se utiliza para el ensayo de tangente delta es el *TOR-3 LSL* de *Globecore*. Este objeto de ensayo está diseñado para determinar la tangente del ángulo de pérdida dieléctrica, la resistividad específica y la permeabilidad del aceite de transformador y otros líquidos dieléctricos. El objeto de ensayo puede configurarse de acuerdo con las normas *IEC 60247*, *ASTM D924* y *ASTM D1169*.

El principio de operación consiste en evaluar la diferencia de amplitudes y fases entre las señales generadas al aplicar simultáneamente una tensión sinusoidal de prueba, con un valor eficaz de hasta $2[kV]$, tanto al condensador de referencia como al objeto de análisis, que corresponde a la celda de medición del sistema. La diferencia en las amplitudes de las señales obtenidas desde el condensador de referencia y el electrodo interno de la celda de medición está relacionada directamente con la constante dieléctrica del líquido analizado. Por otro lado, la diferencia de fase entre estas señales permite determinar el valor de la tangente de pérdida dieléctrica.

Figura 3.11: *TOR-3 LSL* utilizado para medición de tangente delta.



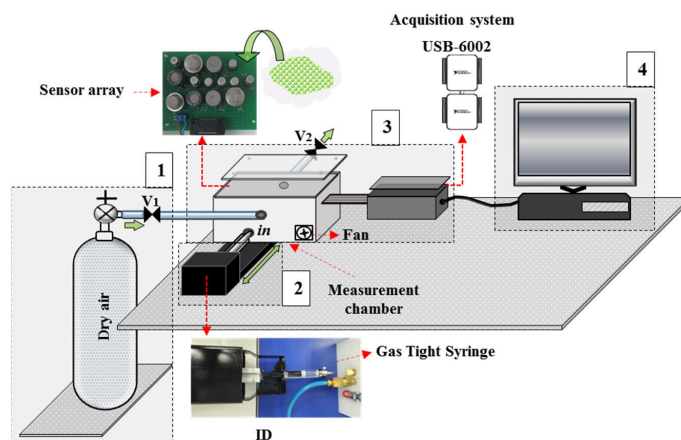
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al procedimiento para la medición, se necesita que se llene la celda de medición con el fluido a ensayar hasta que se pueda observar el aceite en ambos tubos blancos que se aprecian en la figura y luego se drena el aceite a modo de limpieza de la celda, repitiendo este proceso una segunda vez; al tercer llenado no se drena el fluido y se procede a ajustar el programa en la norma deseada y se ejecuta el ensayo. El objeto aumenta la temperatura del fluido hasta estabilizarse en 100°C para proceder con la medición. Al terminar, el programa nos permite descargar un archivo de formato *pdf* con los datos obtenidos. Sin embargo, como lo dicta la norma, el ensayo debe repetirse y si la diferencia entre ambas mediciones no supera un 10 % el ensayo es aceptado como bueno; en caso contrario es necesario volver a efectuar ambas mediciones.

3.7. Análisis de gases disueltos

En primer lugar, se debe mencionar de dónde se obtienen las muestras de aceite para el DGA. Por cada tipo de fluido de prueba generan 60 rupturas donde cada 20 rupturas se extrae aceite para evaluar el contenido de gases disueltos y observar la evolución de dichos gases al aumentar las rupturas.

Figura 3.12: Esquema de la nariz electrónica.



Fuente: A Novel E-Nose System for the Characterization of Dissolved Gases in Dielectric Oils [28].

La Figura 3.12 muestra de manera enumerada los procesos necesarios desde el momento en que se obtiene la muestra hasta que se identifican los parámetros característicos a partir de la respuesta de los sensores de gas para el análisis.

- Etapa 1: Limpieza y extracción de gases en la cámara de medición.
- Etapa 2: Extracción e inyección de gases disueltos.
- Etapa 3: Medición y adquisición de gases.
- Etapa 4: Procesamiento, extracción y visualización de parámetros.

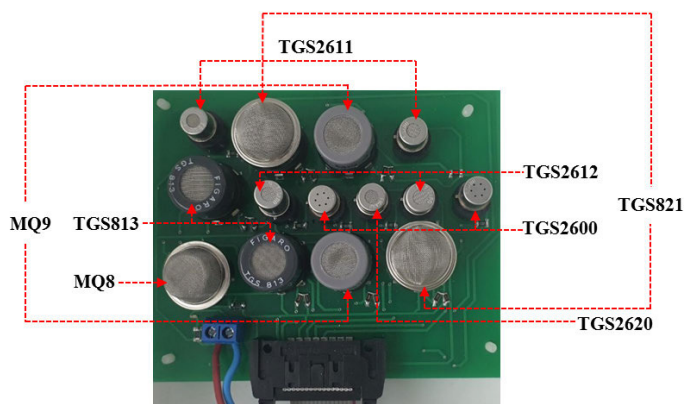
La primera etapa inicia con la apertura de las válvulas $V1$ y $V2$ logrando una circulación de aire seco con un caudal constante de $2[L/min]$ dentro de la cámara de medición

durante 2 minutos, permitiendo la extracción controlada de los gases remanentes. Además, la circulación de aire seco ayuda a estabilizar la respuesta de los sensores, permitiendo alcanzar sus condiciones iniciales más rápido. Es importante destacar que V2 cuenta con un sistema antirretorno para evitar la entrada de cualquier agente contaminante externo que altere la respuesta de los sensores durante la apertura [28].

La segunda etapa se divide en dos partes: extracción de gases e inyección de gases. La extracción de gases inicia al colocar la muestra de aceite contaminado en un recipiente de $20[mL]$, purgado con argón y sellado con un septum. El recipiente no se llena completamente, creando una fase gaseosa (headspace) sobre el aceite y el purgado se realiza mediante una aguja que inyecta argón a $2[L/min]$ durante 30 segundos, y otra que permite la salida del gas. Tras 30 minutos de agitación a $70^{\circ}C$, los gases del headspace se extraen con una jeringa hermética. Para la segunda parte, los gases extraídos se inyectan en la cámara de medición mediante un dispositivo de inyección (ID) controlado por un motor DC. Además, un ventilador en la cámara distribuye los gases de manera uniforme para que todos los sensores los detecten. Para controlar el flujo de la jeringa se usa el ID, el cual avanza el émbolo de la jeringa a $0,14[cm/s]$, ajustado mediante un controlador PWM para garantizar respuestas consistentes [28].

El tercer etapa se centra en la medición y adquisición de gases, el cual se realizó con una matriz de 14 sensores montados en una placa (similar a la placa referencial de la Figura 3.13). Estos sensores detectan gases mediante cambios en su conductividad eléctrica. El sistema de adquisición utiliza una frecuencia de muestreo de 1 muestra por segundo. La comunicación entre los sensores y el sistema se realizó a través de una puerta hermética para evitar interferencias externas [28].

Figura 3.13: Placa referencial con sensores de medición.



Fuente: A Novel E-Nose System for the Characterization of Dissolved Gases in Dielectric Oils [28].

Se utilizaron 11 sensores diferentes en total. Sin embargo, al incluir los sensores duplicados (TGS2600, TGS813 y TGS821), el conjunto final consta de 14 sensores. Esta incorporación de sensores duplicados mejora la fiabilidad de la nariz electrónica, permitiendo verificar de manera consistente la homogeneización adecuada dentro de la cámara de muestras [36]. En la Tabla 3.2 se detallan los sensores empleados, junto con las especificaciones del fabricante y los gases de interés que pueden detectar.

Tabla 3.2: Tipos de sensores, especificación del fabricante y sensibilidad a los gases de interés.

| Sensor | Specificity | Gases of Interest |
|--------------|------------------|---------------------------|
| MQ 135 | VOCs | H2 |
| MQ 9 | CO, LP gas | CH4 |
| TGS 2602 | Air contaminants | H2, CH4 |
| TGS 2612 | CH4, LP gas | CH4, C2H2, C2H4 |
| TGS 2600 | Air contaminants | H2, CH4, C2H6, C2H4, C2H2 |
| TGS 813 | Air quality | H2, C2H2, CH4 |
| TGS 821 | H2 | H2, CH4, C2H2 |
| TGS 2611-E00 | CH4 | CH4, H2 |
| TGS 2620 | VOCs, CO | H2, C2H2, CH4, C2H4 |
| TGS 2611-C00 | CH4, VOCs | CH4, H2, C2H2, C2H4 |
| MQ 8 | H2 | H2, CH4 |

Fuente: Performance assessment of machine learning techniques in electronic nose systems for power transformer fault detection [36].

Donde *VOCs* se refiere a compuestos orgánicos volátiles y *LP gas* al gas licuado de petróleo (principalmente propano/butano).

Para los resultados experimentales, el parámetro característico utilizado para representar la respuesta de los sensores es la diferencia entre el valor máximo de voltaje y el valor inicial en condiciones estables, definido como [28]:

$$\Delta V = V_{max} - V_0 \quad (3.1)$$

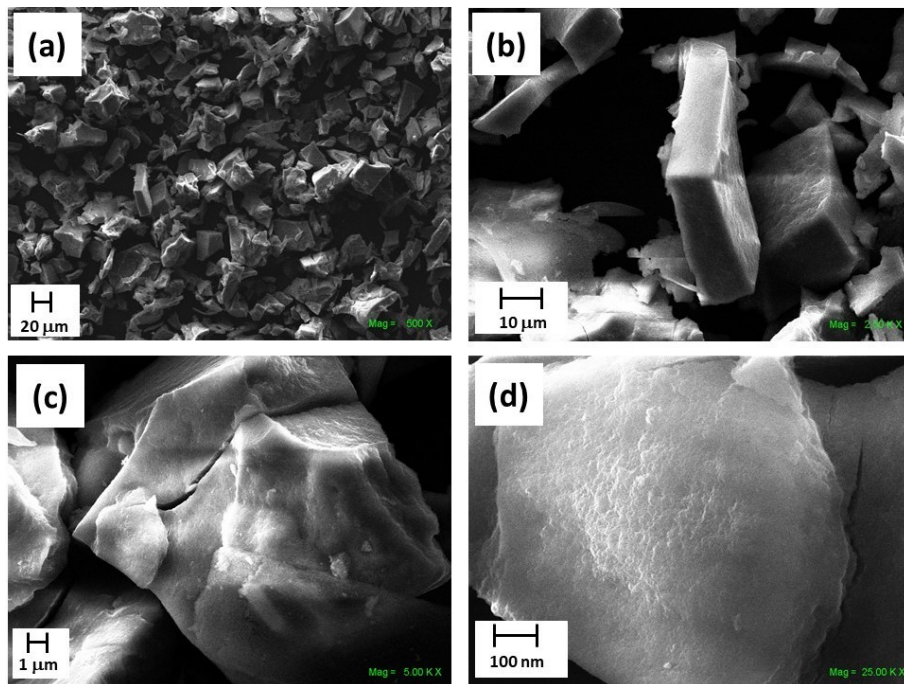
Capítulo 4

Análisis y resultados

4.1. Nanopartículas y Nanofluido

La caracterización morfológica de las nanopartículas se realiza mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM Zeiss a 30[kV]), dando como resultado la Figura 4.1.

Figura 4.1: Nanopartículas de C_rOOH en diferentes escalas usando SEM.



Fuente: Elaboración propia.

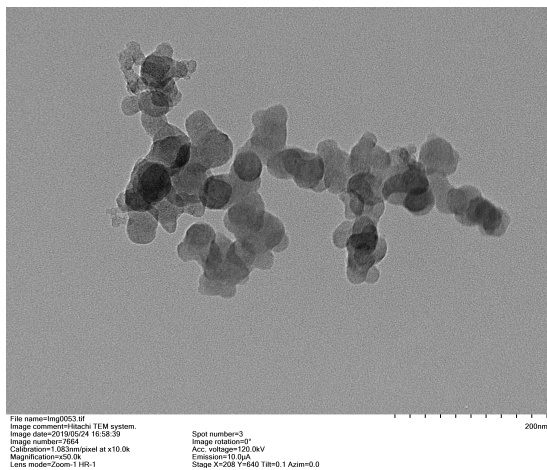
La Figura 4.1 presenta los resultados obtenidos mediante el uso del microscopio electrónico de barrido (SEM), permitiendo un análisis morfológico y superficial de los materiales sintetizados. Las imágenes, que progresan en aumento desde (a) hasta (d), revelan una gran cantidad de estructuras de bloques aglomerados con variaciones en tamaño y grosor. En la Figura 4.1(b) se observa una vista lateral de una estructura compuesta por partículas

de $CrOOH$, donde cada bloque tiene un ancho de aproximadamente $30[\mu m]$ y un grosor de alrededor de $10[\mu m]$. La Figura 4.1(c) ofrece una vista ampliada de un bloque individual, destacando su forma irregular y superficie rugosa. Finalmente, en la Figura 4.1(d) se aprecia una gran cantidad de partículas pequeñas aglomeradas en la superficie del bloque, lo que sugiere que estos bloques están compuestos por nanopartículas de $CrOOH$ unidas entre sí.

La aglomeración visible en las micrografías SEM podría ser resultado del proceso de liofilización aplicado a los materiales suspendidos sintetizados para obtener muestras secas. Inicialmente, la muestra se congeló a $-20^{\circ}C$ sin emplear dispersantes o tensioactivos, y posteriormente se secó en un liofilizador bajo vacío. Estos pasos provocaron que las nanopartículas se agruparan, formando grandes bloques.

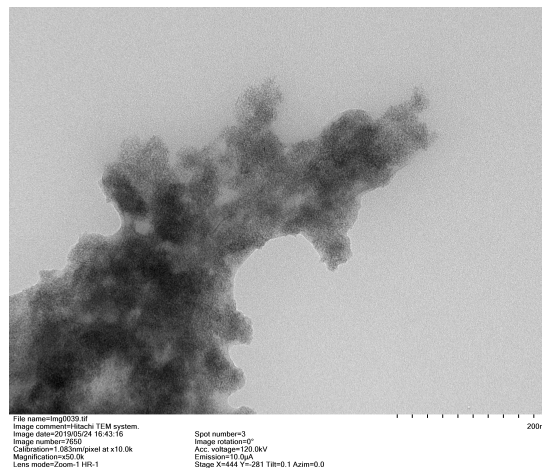
La Microscopía Electrónica de Transmisión es una técnica de alta resolución que permite analizar la estructura y composición de materiales a nivel nanométrico. Utiliza un haz de electrones que atraviesa una muestra ultrafina, generando imágenes detalladas de su morfología y estructura cristalina. Mediante esta técnica, fue posible observar en detalle la forma y tamaño de las nanopartículas individuales.

Figura 4.2: Imagen TEM del material $CrOOH$.



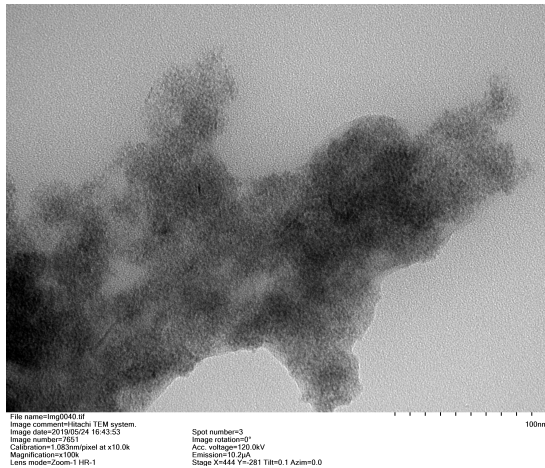
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3: Imagen TEM del material $CrOOH$ sintetizado en escala de $200[nm]$.



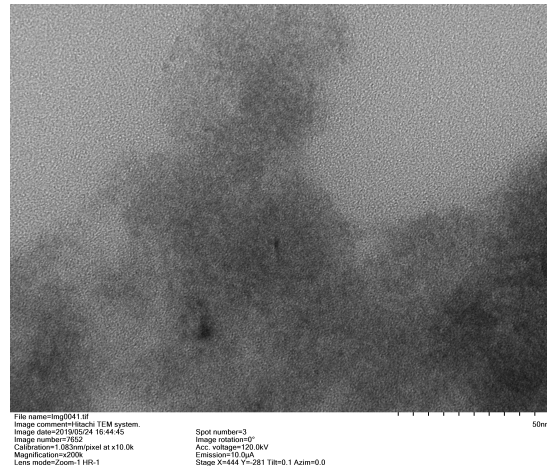
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.4: Imagen TEM del material $CrOOH$ sintetizado en escala de 100[nm].



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.5: Imagen TEM del material $CrOOH$ sintetizado en escala de 50[nm].



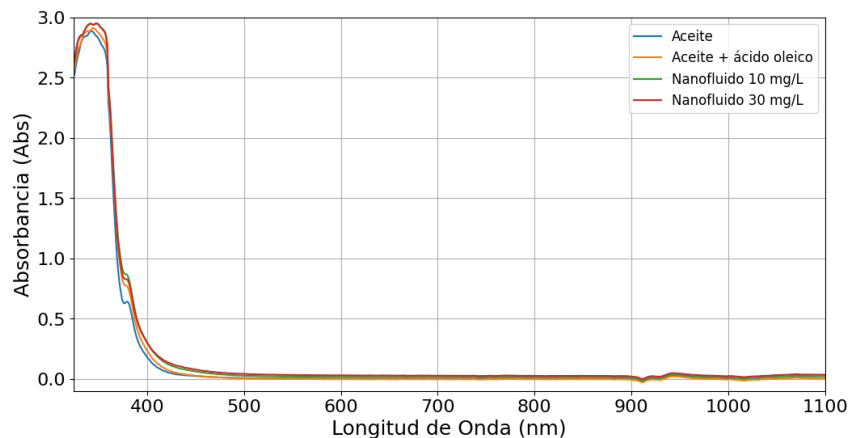
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.2 revela la presencia de pequeñas estructuras semejantes a nanopartículas, mientras que la Figura 4.3 muestra grupos de estas estructuras aglomeradas de más cerca. Las imágenes de mayor aumento como la Figura 4.4 y Figura 4.5 permiten observar la formación de nanopartículas ultrapequeñas, con tamaños que se acercan a los 2 Y 4 [nm] con forma indistinguible. A partir de las imágenes TEM y SEM, se comprueba que el material $CrOOH$ sintetizado por el método hidrotérmal, forma partículas de tamaño nanométrico y morfología multimodal que tienden a aglomerarse.

4.2. UV-Visible

Que exista un aumento en el valor de la absorbancia se traduce en un aumento en la capacidad de energía absorbida a una cierta longitud de onda, aumentando las capacidades de retención de la energía en el rango de onda que se genere ese aumento.

Figura 4.6: Gráfica de absorbancia vs longitud de onda en ensayo UV-Visible.

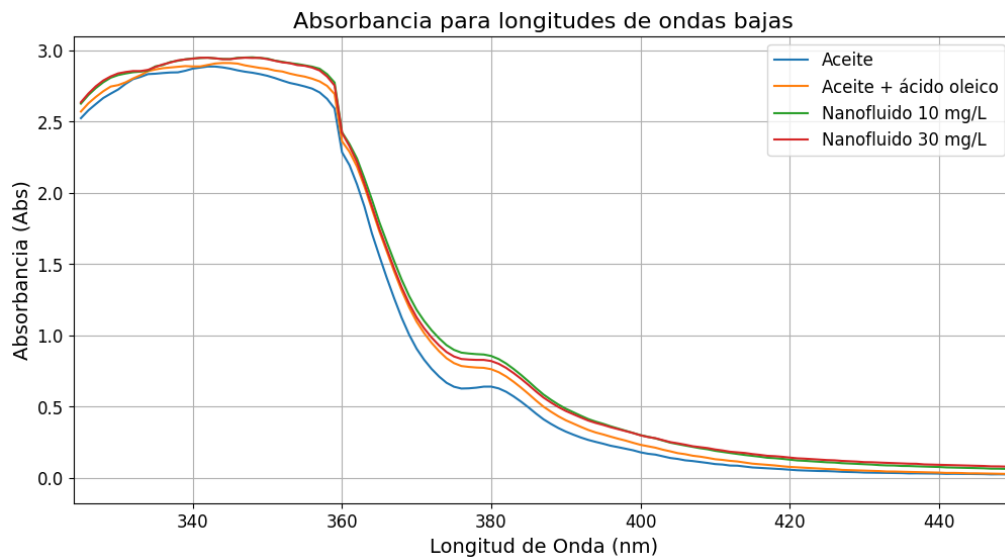


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.6 se presentan los datos de absorbancia en base a las longitudes de onda que atraviesan cada sustancia aislante. En ella se observa que el comportamiento a lo largo de las longitudes de onda aplicadas sigue prácticamente un mismo patrón; sin embargo, también es apreciable que presentan pequeñas variaciones en el nivel de absorbancia.

En la Figura 4.7 y Figura 4.8 se reduce el rango de longitud de onda para presenciar de mejor manera el comportamiento de la absorbancia. Primero, en la Figura 4.7 se observa que el pico de absorbancia se encuentra cercano a los 350[nm] , seguido de una posterior disminución, donde cerca de los 450[nm] se estabiliza. Por otra parte, se puede observar que la absorbancia del aceite alcanza valores menores que el resto; luego la mezcla de aceite y el surfactante aumenta un poco su valor, mientras que los nanofluidos aumentan en mayor medida su nivel de absorbancia con valores y comportamiento casi idénticos, dando cuenta de que para longitudes de entre 320[nm] y 360[nm] la concentración de nanopartículas no es un factor clave.

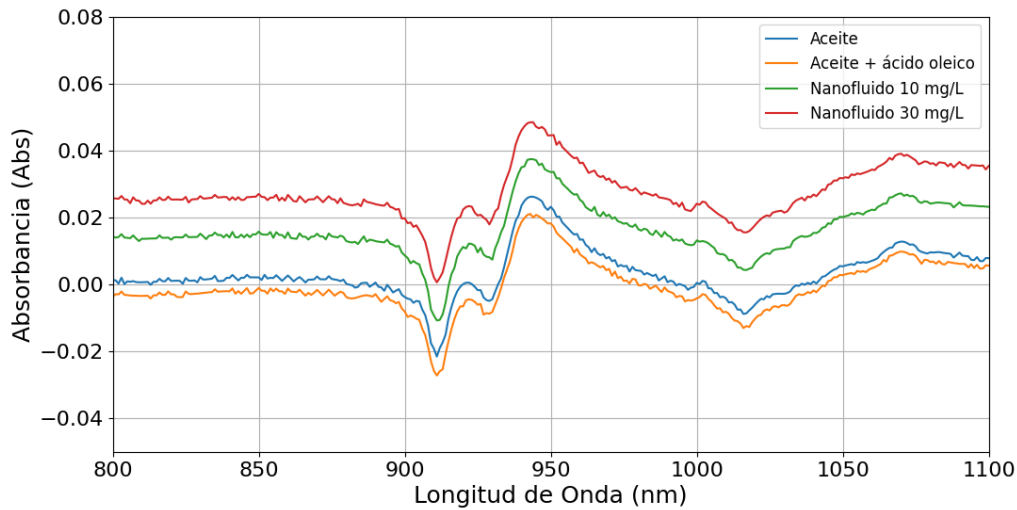
Figura 4.7: Absorbancia para baja longitud de onda.



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la Figura 4.8 para longitudes de onda entre los 800[nm] y los 1100[nm] , se distinguen dos observaciones. En primer lugar, la muestra que contiene únicamente aceite y ácido oleico (surfactante) presenta menos absorbancia que el aceite limpio. En segundo lugar, para estos niveles de longitud de onda, la concentración de NP en el fluido sí impacta la absorbancia.

Figura 4.8: Absorbancia para alta longitud de onda.



Fuente: Elaboración propia.

En ambas figuras se determinó que a mayor contaminación de nanopartículas se presenta un mayor impedimento en la circulación de ondas. A pesar de esto, el comportamiento de las muestras es similar, manteniendo el perfil de una solución sin partículas en suspensión.

4.3. Rigidez Dieléctrica

La rigidez dieléctrica determina la capacidad del aislante, en este caso líquido, de soportar tensión sin producir ruptura. En la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 se presentan los valores obtenidos luego de someter muestras de líquido aislante mineral a campos eléctricos, bajo la norma *IEC-60156*.

Tabla 4.1: Rigidez dieléctrica con concentración de 10 y 40 [mg/L].

| Elemento | Promedio [kV] | Variación Porcentual [%] |
|-----------------------|---------------|--------------------------|
| Aceite | 35,28 | - |
| Aceite + Ácido Oleico | 53,07 | 50 |
| Nanofluido 10 [mg/L] | 60,10 | 70 |
| Nanofluido 40 [mg/L] | 42,22 | 20 |

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4.1 deja vista un evidente aumento en el nivel de tensión necesaria para la ruptura del líquido aislante, donde el aceite presenta un nivel de tensión menor; luego, al incorporar el surfactante a la solución (10% del volumen del líquido base) la ruptura sucede a una tensión mayor aumentando un 50%. Al conformar el nanofluido con una concentración de nanopartículas de 10[mg/L], la tensión de ruptura vuelve a aumentar, generando un aumento del 70%. Sin embargo, al poner a prueba un nanofluido con una concentración de nanopartículas de 40[mg/L], se presentó una disminución de la tensión

de ruptura, implicando que las nanopartículas de C_rOOH , el cual es un óxido de metal, comenzaran a adquirir propiedades propias de un óxido de metal.

De igual manera, se ejecuta otro ensayo en donde se presentan las mismas muestras, pero se reemplaza la muestra de nanofluido disminuyendo su concentración a $30[mg/L]$. Estos resultados se pueden observar en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Rigidez dieléctrica con concentración de 10 y 30 [mg/L].

| Elemento | Promedio [kV] | Variación Porcentual [%] |
|-----------------------|---------------|--------------------------|
| Aceite | 35,60 | - |
| Aceite + Ácido Oleico | 55,87 | 57 |
| Nanofluido 10 [mg/L] | 63,33 | 78 |
| Nanofluido 30 [mg/L] | 45,90 | 29 |

Fuente: Elaboración propia.

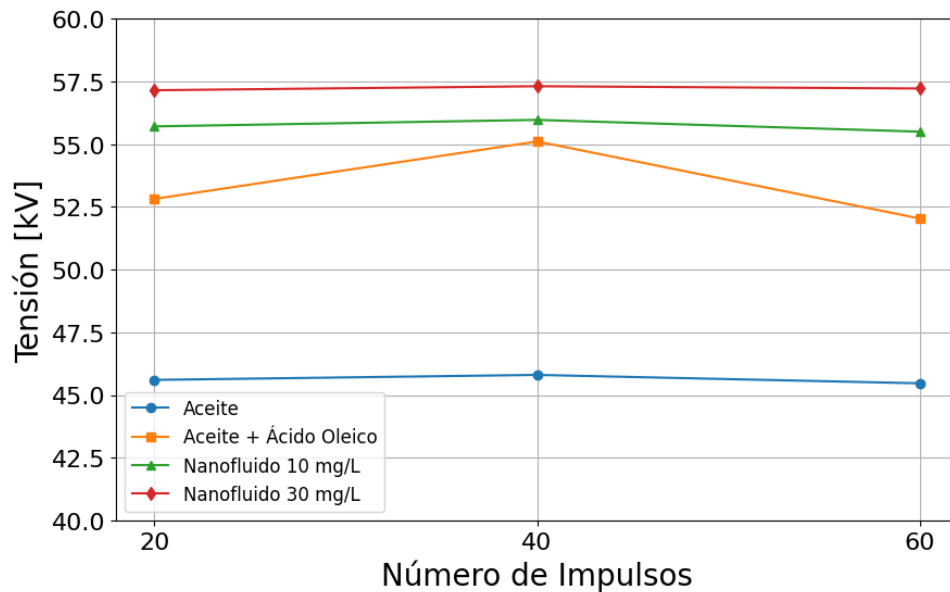
En la Tabla 4.2 observa un patrón similar al de la tabla anterior, reafirmando el aumento de capacidad del aislante al incluir el surfactante y las nanopartículas, de igual manera para la concentración de $30[mg/L]$, presenta una disminución en su tensión de ruptura, pero de un valor mayor a su contraparte de la Tabla 4.1.

El comportamiento mostrado en las tablas 4.1 y 4.2 deja en evidencia que la incorporación de nanopartículas genera un aumento en la rigidez dieléctrica del líquido aislante generando aumentos de hasta un 78%. Sin embargo, en ambos casos, la mayor concentración sufrió una caída en el valor de la tensión disruptiva, indicando que existe un límite en la concentración de nanopartículas que optimiza las propiedades del aislante líquido.

4.4. Descargas parciales tipo impulso

La Figura 4.9 muestra los resultados al aplicar los ensayos de impulsos tipo rayo a muestras de aceite contaminado con nanopartículas con configuración de electrodos punta-plano.

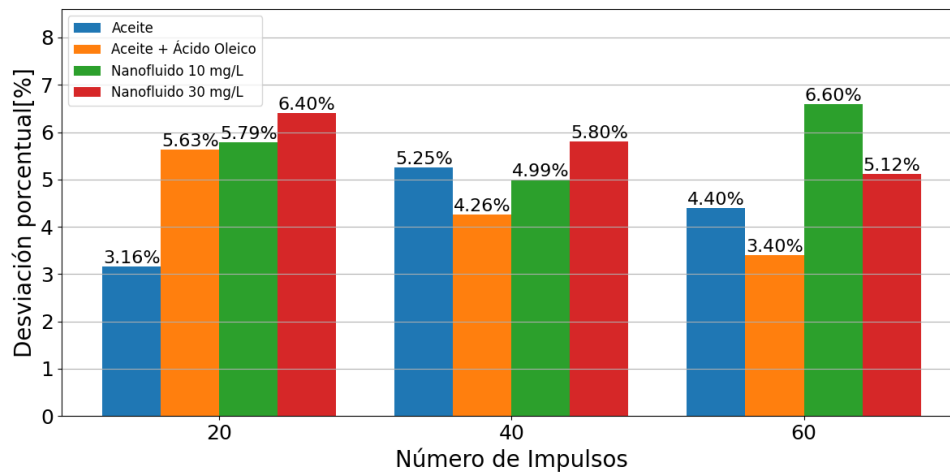
Figura 4.9: Tensiones de ruptura promedio de 20, 40 y 60 impulsos.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.9 se observa un aumento paulatino en la incorporación de nanopartículas al fluido base, aumentando la capacidad de resistir tensiones entre terminales. A su vez, el mayor aumento se presenta cuando mayor es la cantidad de nanopartículas presentes en la muestra; no obstante, no existe un aumento significativo en comparación a los valores de una concentración menor de nanopartículas, indicando que la cantidad de nanopartículas presenta un límite máximo de concentración admisible en el fluido aislante. Adicionalmente, la Figura 4.10 muestra que los datos obtenidos para los fluidos probados no presentaron desviaciones de valores superiores a 6,6 %, lo que muestra una baja dispersión de los datos.

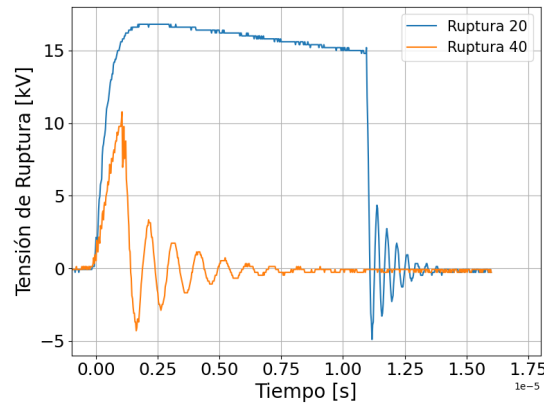
Figura 4.10: Desviación porcentual de tensiones en base al número de impulsos.



Fuente: Elaboración propia.

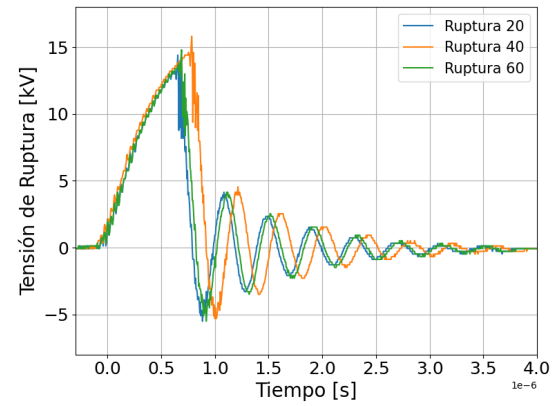
Por otro lado, por cada 20 rupturas se obtuvo una curva característica del lugar donde ocurre la ruptura, así se pudo determinar el tipo de ruptura presente en dicho intervalo de rupturas.

Figura 4.11: Curva de impulsos para muestras de aceite en 20 y 40 rupturas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.12: Curva de impulsos para muestras de aceite con ácido oleico.

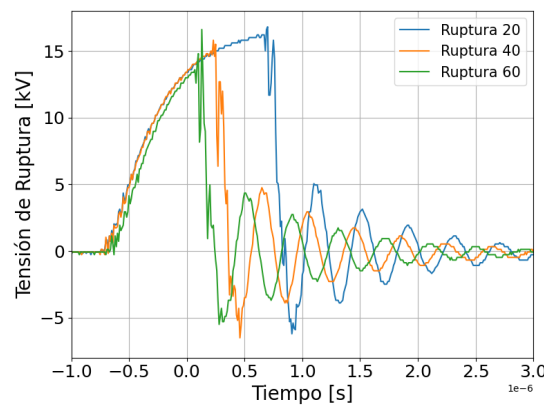


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.11 se observa que, para el aceite, hay solo dos curvas. Una de ellas representa un ensayo con un impulso tipo rayo cortado en el frente, lo que significa que el fluido aislante no pudo soportar la tensión máxima, provocando una ruptura antes de alcanzarla. La segunda curva muestra un impulso tipo rayo cortado en la cola, lo que indica que la ionización del material aislante ocurrió de manera progresiva hasta que la ruptura se produjo en la cola.

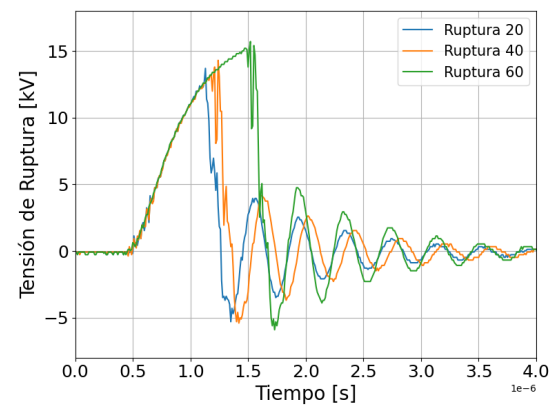
Por otro lado, la Figura 4.12 muestra que, en la mezcla de aceite con surfactante, cada curva representa una ruptura por impulso cortado en el frente, ya que esta ocurre antes de alcanzar el peak.

Figura 4.13: Curva de impulsos para muestras de nanofluido 10[mg/L].



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.14: Curva de impulsos para muestras de nanofluido 30[mg/L].



Fuente: Elaboración propia.

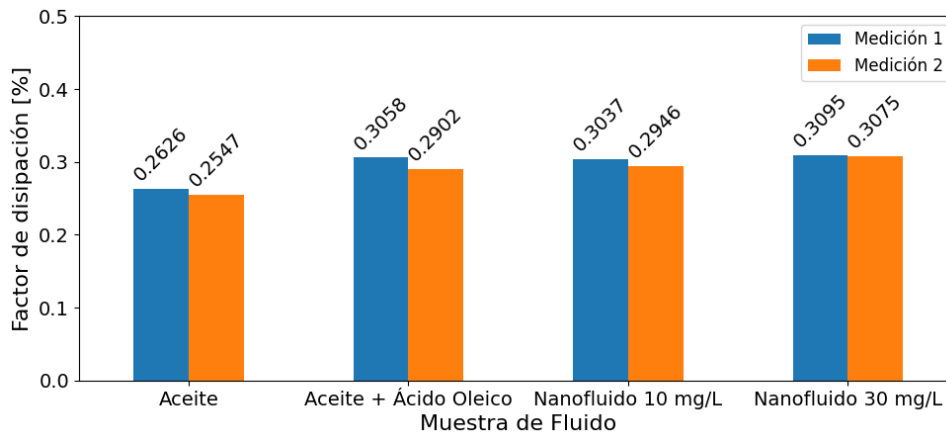
En cuanto a las Figuras 4.13 y 4.14, que representan las curvas de ruptura de los

nanofluidos con concentraciones de $10[mg/L]$ y $30[mg/L]$, respectivamente, se observa que cada curva corresponde a un ensayo con un impulso cortado en el frente. Esto significa que la onda no alcanza su punto máximo, ya que se ioniza rápidamente y se interrumpe antes de llegar al peak.

4.5. Tangente delta

El ensayo para determinar el Factor de Disipación (FD) permite determinar las pérdidas de energía y el estado de envejecimiento que se producen en un aislante. En la Figura 4.15 se presentan los valores de tangente delta para las diferentes muestras, basando el ensayo en la norma *ASTM D924*. Inicialmente, se ensayó con la muestra de aceite, la cual presentó un valor promedio de $0,2587\%$, seguido de la mezcla de aceite y surfactante al 10% del volumen de aceite, generando un aumento del $15,2\%$ en el valor promedio respecto al aceite. En el caso de las muestras de nanofluidos, se presenta un aumento del $15,6\%$ y $19,3\%$ en el FD para las concentraciones de $10[mg/L]$ y $30[mg/L]$, respectivamente, con respecto al fluido base.

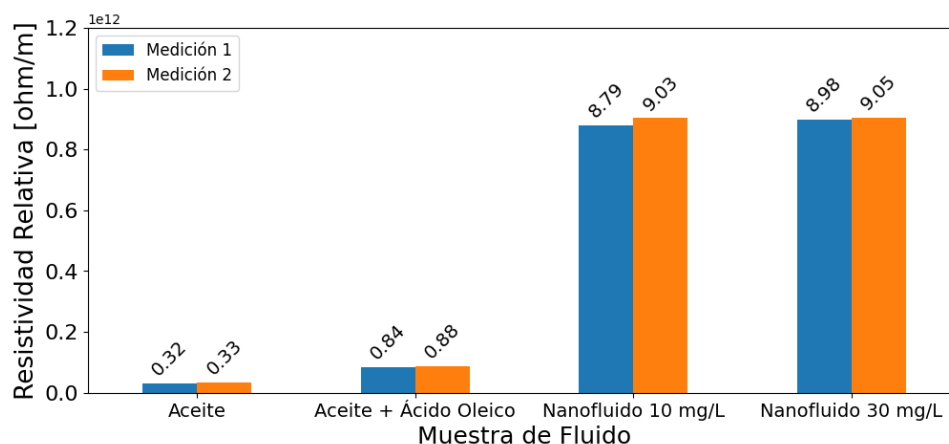
Figura 4.15: Valores de tangente δ para muestras de fluido aislante.



Fuente: Elaboración propia.

El Equipo de ensayo *TOR-3 LSL* permite también obtener los valores de resistividad relativa de las muestras; estos valores se representan en la Figura 4.16 a continuación.

Figura 4.16: Valores de resistividad relativa para muestras de fluido aislante.



Fuente: Elaboración propia.

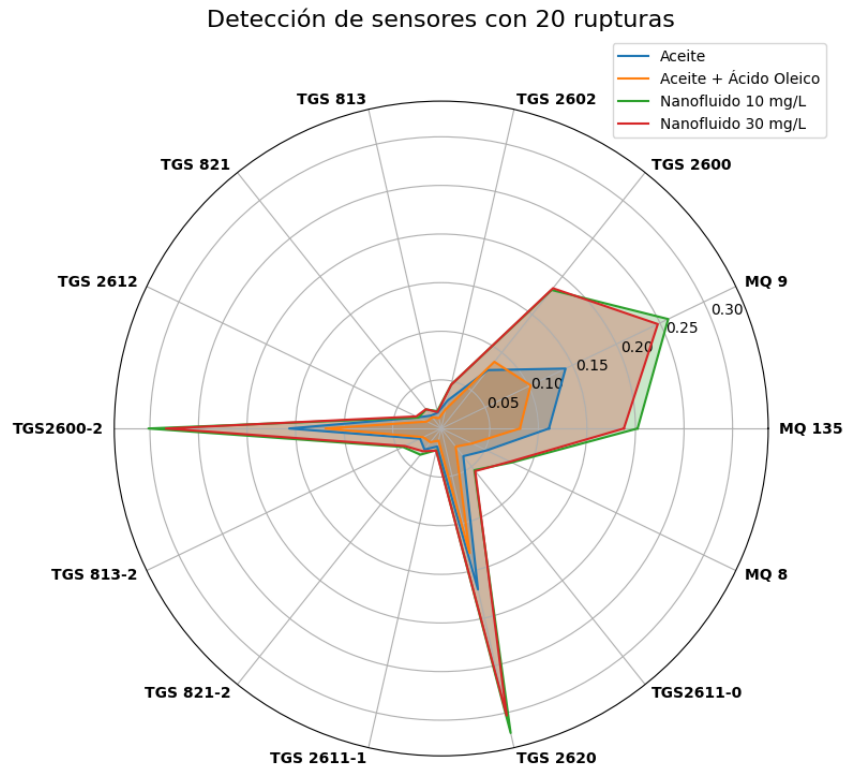
En cuanto a la resistividad relativa de las muestras, se observa un claro aumento de valores al evaluar los nanofluidos, generando un aumento superior a 2700 %, es decir, un aumento de un orden de magnitud al incluir las nanopartículas en el fluido base. Por otro lado, la variación de la resistividad que entre los nanofluidos de diferentes concentraciones no supera el 2,2 %.

En base a estos resultados, se aprecia un aumento considerable en el factor de disipación al incorporar nanopartículas al aceite; sin embargo, el mayor aumento se presentó debido al surfactante, ya que este se usa para evitar la aglomeración de las nanopartículas, generando un aumento en la viscosidad del fluido, por lo cual aumentan las pérdidas de energía al contaminar el aceite base. En cuanto a la resistividad, las nanopartículas son las principales protagonistas del aumento de los valores, lo que radica en una disminución de la movilidad iónica que promueve la conducción del material.

4.6. Análisis de gases Disueltos

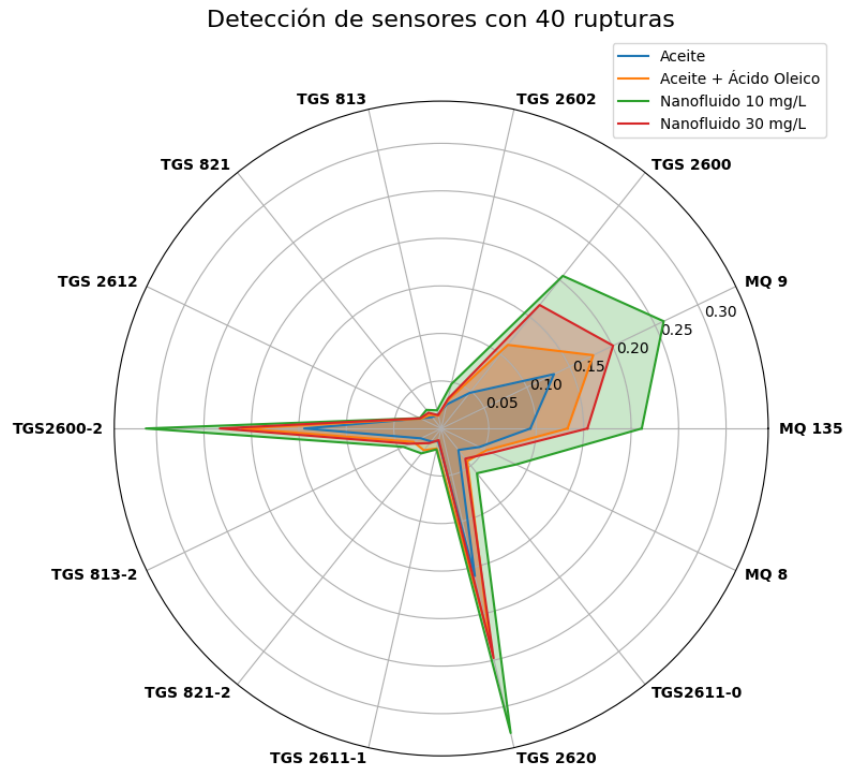
El sistema E-Nose permite detectar y clasificar cambios en los gases disueltos en aceite de transformadores, lo que facilita el diagnóstico de fallas y ayuda a detectar el estado del fluido aislante. A continuación, se presentan los resultados interpretados como variaciones entre los valores máximos y mínimos, en gráficos radiales agrupados en la cantidad de rupturas por muestra.

Figura 4.17: Gráfico radial de variación de tensión de sensores para muestras con 20 rupturas.



La Figura 4.17 muestra la máxima variación de tensión registrada por cada sensor tras 20 rupturas aplicadas a cada muestra. En dicha figura se observa que, independientemente de la muestra, los sensores *TGS2620* y *TGS 2600-2* presentan la mayor variación de tensión, seguidos por los sensores *MQ 9*, *MQ135* y *TGS 2600*. También se aprecia que la incorporación de nanopartículas aumenta la variación sensorial detectada, lo que sugiere un incremento en la generación de gases en los nanofluidos. Además, se evidencia que la concentración de nanopartículas en el nanofluido no afecta de manera significativa la detección de los sensores durante las primeras 20 rupturas.

Figura 4.18: Gráfico radial de variación de tensión de sensores para muestras con 40 rupturas.

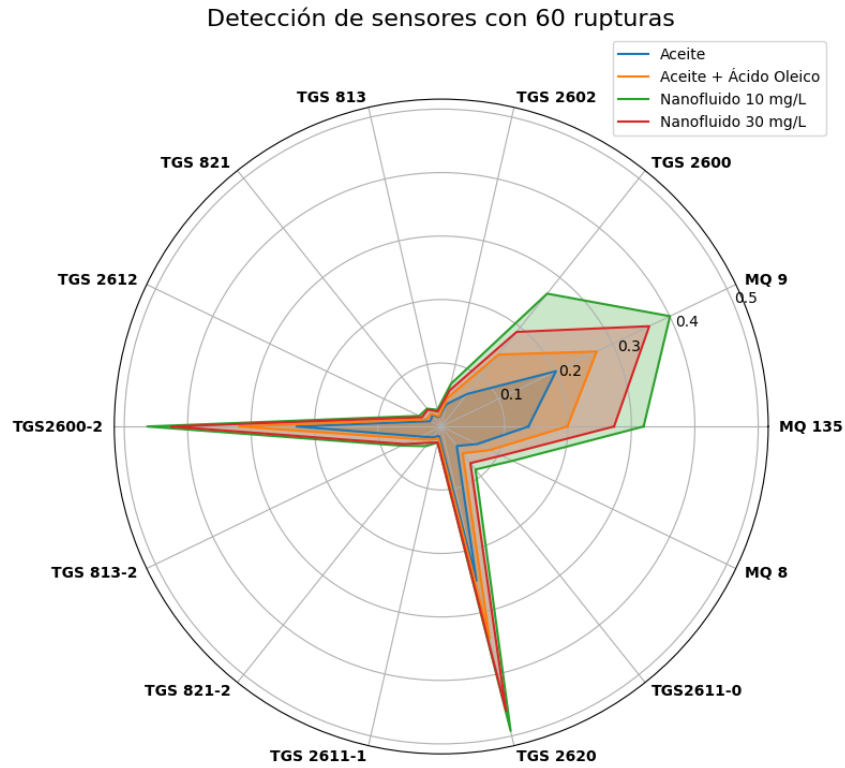


Fuente: Elaboración propia.

Al continuar aumentando la cantidad de rupturas hasta 40, la Figura 4.18 muestra que la concentración de nanopartículas en el nanofluido no sigue una relación lineal, ya que el nanofluido con menor concentración presenta una mayor variación de tensión en todos los sensores. Sin embargo, los sensores *TGS2620* y *TGS2600-2* muestran una variación similar en las muestras de nanofluido con una concentración de $30[mg/L]$ y en el fluido de aceite con ácido oleico, mientras que los sensores *MQ 9*, *MQ135* y *TGS 2600* detectan una mayor sensibilidad en el nanofluido con $10[mg/L]$. No obstante, la presencia de nanopartículas sigue aumentando la detección de gases en comparación con el aceite.

Al alcanzar 60 rupturas, la Figura 4.19 muestra un aumento en la variación de tensión detectada por todos los sensores. Además, se observa que un incremento en la concentración de nanopartículas disminuye la presencia de gases detectados. El orden de las variaciones sigue siendo el mismo que en las muestras con menor número de rupturas; es decir, la mayor variación de tensión se presenta en los sensores *TGS2620* y *TGS 2600-2*, seguidos de los sensores *MQ 9*, *MQ135* y *TGS 2600*.

Figura 4.19: Gráfico radial de variación de tensión de sensores para muestras con 60 rupturas.



Fuente: Elaboración propia.

Según los gráficos analizados y en base a la Tabla 3.2, los posibles gases detectados por los sensores pueden ser C_2H_2 , H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 y CH_4 . De estos gases, tres sensores detectan CH_4 y H_2 , seguido de los gases C_2H_2 y C_2H_4 , los cuales pueden ser detectados por dos sensores, como se visualiza en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Gases que pueden detectar los sensores con mayor variación de tensión.

| H_2 | CH_4 | C_2H_6 | C_2H_4 | C_2H_2 | |
|-------|--------|----------|----------|----------|----------|
| x | x | x | x | x | TGS 2600 |
| x | x | | x | x | TGS 2620 |
| x | | | | | MQ 135 |
| | x | | | | MQ 9 |

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 5

Conclusiones

El análisis morfológico de las muestras sintetizadas, realizado mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y transmisión (TEM), permitió identificar la formación de bloques aglomerados de *CrOOH* con una estructura heterogénea y una superficie rugosa. Las imágenes SEM revelaron que estos bloques están conformados por la unión de nanopartículas ultrapequeñas, lo que sugiere que el proceso de liofilización influyó en la aglomeración de las mismas. Por otro lado, el análisis TEM confirmó la presencia de nanopartículas amorfas con tamaños en el rango de $2[nm]$ a $4[nm]$, reafirmando su carácter nanométrico. La ausencia de una estructura definida sugiere que la síntesis utilizada favorece la obtención de partículas amorfas.

El análisis de absorbancia mediante espectroscopía UV-Visible permitió evaluar la influencia de la presencia de nanopartículas en la absorción de energía en distintos rangos de longitud de onda. Se identificó que, si bien las muestras presentan un comportamiento general similar, la absorbancia varía en función de la composición del fluido. En el rango de longitudes de onda bajas ($320 - 400[nm]$), la presencia de nanopartículas mostró un aumento en la absorbancia, lo que sugiere que en este espectro la interacción con la radiación depende de la incorporación de nanopartículas. Sin embargo, para ciertos intervalos de longitud de onda, por ejemplo entre $370 - 380[nm]$, la cantidad de nanopartículas no cuenta con una relación directa con el aumento de la absorbancia, producto de la cantidad límite de nanopartículas que se pueden homogeneizar en el fluido. Para longitudes de onda más altas ($800 - 1100[nm]$), sí se evidenció un incremento en la absorbancia con el aumento de la concentración de nanopartículas, lo que indica que estas partículas afectan la capacidad de retención de energía en esta región del espectro. En general, la incorporación de nanopartículas modifica la respuesta óptica del fluido, lo que puede tener implicaciones en aplicaciones donde la absorción de energía en ciertas longitudes de onda sea un factor determinante, como en sistemas de transferencia térmica y almacenamiento de energía.

En cuanto al estudio de la rigidez dieléctrica, este nos permitió evaluar el impacto de la incorporación de nanopartículas en la capacidad del fluido para resistir la ruptura. Los resultados obtenidos muestran que la adición de ácido oleico y nanopartículas de *CrOOH* mejora significativamente la rigidez dieléctrica en comparación con el aceite base, con aumentos de hasta un 78%. Sin embargo, se observó que este efecto no es lineal con la concentración de nanopartículas. Mientras que una concentración de $10[mg/L]$ produjo el mayor aumento en la tensión de ruptura, concentraciones más elevadas (30 y $40[mg/L]$) resultaron en un aumento no mayor al 29% de la rigidez dieléctrica. Estos hallazgos indican

que existe un rango óptimo de concentración de nanopartículas que maximiza la capacidad aislante del fluido.

El análisis de los ensayos de impulsos tipo rayo se observó que la incorporación de nanopartículas mejora la rigidez dieléctrica del fluido, incrementando su capacidad para soportar tensiones antes de la ruptura. Sin embargo, este aumento no es indefinido, ya que se identificó un límite máximo de concentración admisible, a partir del cual la mejora en la resistencia dieléctrica se estabiliza. Además, el análisis de las curvas de impulso reveló que el aceite base mostró dos tipos de fallas: ruptura prematura antes del peak de tensión y ruptura progresiva debido a ionización. En contraste, los fluidos con ácido oleico y nanopartículas mostraron un comportamiento predominantemente de ruptura antes del peak, lo que sugiere una ionización más rápida del material aislante. Estos resultados refuerzan los obtenidos en el ensayo de rigidez dieléctrica de los líquidos aislantes, donde su efectividad depende de una concentración óptima.

Los resultados obtenidos mediante el sistema E-Nose evidencian que la incorporación de nanopartículas en el aceite aislante tiene un impacto significativo en la generación de gases disueltos tras la ocurrencia de descargas dieléctricas. Se observó que, aunque la concentración de nanopartículas no sigue una relación lineal con la variación de tensión, su incorporación incrementa la detección de gases en comparación con el aceite base. Sin embargo, a medida que aumenta el número de rupturas, la producción de gases muestra una tendencia de desaceleración, especialmente en el nanofluido con mayor concentración de nanopartículas, lo que indica que su presencia podría estabilizar el proceso de degradación del fluido en etapas avanzadas. Además, a medida que aumenta el número de rupturas, la respuesta de los sensores se intensifica, con los modelos *TGS2620* y *TGS2600-2* mostrando la mayor sensibilidad. Por otra parte, el análisis de los gases detectados sugiere la presencia de H_2 , CH_4 , C_2H_4 y C_2H_2 , lo que, conforme a la norma *IEC 60599*, podría clasificar las rupturas como descargas de baja energía (D1).

Finalmente, estos hallazgos evidencian mejoras en la rigidez dieléctrica, la absorción de energía y el comportamiento óptico, permitiendo identificar que una concentración óptima de $10[mg/L]$ de nanopartículas mejora las propiedades dieléctricas. Esto se debe a que el surfactante genera una capa alrededor de las nanopartículas, dificultando la formación de caminos conductivos y, en consecuencia, aumentando la resistencia dieléctrica del fluido. En contraste, concentraciones más altas ($30[mg/L]$) afectan negativamente estas propiedades, ya que el surfactante no logra formar capas suficientemente fuertes en las nanopartículas, lo que facilita la creación de caminos conductivos. Además, la presencia de nanopartículas influye en la generación de gases durante las descargas dieléctricas, acelerando la descomposición del aceite en etapas iniciales y estabilizándola en concentraciones más altas.

Como trabajo futuro, se considera relevante investigar el impacto de nanofluidos de aceite/*CrOOH* en el envejecimiento de los aceites y su desempeño a largo plazo, especialmente en condiciones de alta tensión. También se recomienda encontrar la concentración óptima de nanopartículas que maximice las distintas propiedades dieléctricas del aceite aislante.

Capítulo 6

Anexos

6.1. Datos cuantitativos y tablas de resultados

6.2. Rigidez Dieléctrica

A continuación, se presentan los datos obtenidos mediante ensayo de rigidez dieléctrica.

Tabla 6.1: Valores obtenidos de primer ensayo de rigidez dieléctrica según norma *IEC-60156*.

| Fluido | Aceite | Aceite + Á. Oleico | NF 10[mg/L] | NF 40[mg/L] | |
|---------------------|--------|--------------------|-------------|-------------|------|
| Ruptura [kV] | 1 | 29,6 | 36,8 | 61,5 | 36,1 |
| | 2 | 38,3 | 55,3 | 60,1 | 42,7 |
| | 3 | 38 | 56,7 | 60,8 | 42,8 |
| | 4 | 43,3 | 54,4 | 52,2 | 43,5 |
| | 5 | 32,4 | 57,5 | 66 | 49,3 |
| | 6 | 30,1 | 57,7 | 60 | 38,9 |
| Promedio [kV] | 35,28 | 53,07 | 60,10 | 42,22 | |
| Des. Estándar [kV] | 5,44 | 8,07 | 4,46 | 4,49 | |
| Des. Porcentual [%] | 15,4 | 15,2 | 7,4 | 10,6 | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.2: Valores obtenidos de segundo ensayo de rigidez dieléctrica según norma IEC-60156.

| Fluido | | Aceite | Aceite + Á. Oleico | NF 10[mg/L] | NF 30[mg/L] |
|---------------------|---|--------|--------------------|-------------|-------------|
| Ruptura [kV] | 1 | 30 | 41 | 57,1 | 53,1 |
| | 2 | 34,5 | 58,7 | 61,6 | 45,5 |
| | 3 | 32,8 | 55 | 68,1 | 49,4 |
| | 4 | 36,4 | 60,3 | 70,2 | 40,4 |
| | 5 | 38,6 | 63,5 | 68 | 41,4 |
| | 6 | 41,3 | 56,7 | 55 | 45,6 |
| Promedio [kV] | | 35,60 | 55,87 | 63,33 | 45,90 |
| Des. Estándar [kV] | | 4,06 | 7,85 | 6,37 | 4,79 |
| Des. Porcentual [%] | | 11,4 | 14,1 | 10,1 | 10,4 |

Fuente: Elaboración propia.

6.2.1. Descargas tipo impulso

A continuación, se presentan los datos obtenidos mediante ensayo de descargas de tipo impulso.

Tabla 6.3: Tensiones de ruptura en ensayo de impulso para Aceite desgasificado.

| Impulsos | V_{ac} [kV] | V1 [kV] | I_1 [A] | V_{imp} [kV] | σ [kV] | ϵ % |
|----------|---------------|---------|-----------|----------------|---------------|--------------|
| 1 a 20 | 60,27 | 128 | 2,5 | 45,61 | 1,44 | 3,16 % |
| 21 a 40 | 60,41 | 128 | 2,5 | 45,81 | 2,4 | 5,25 % |
| 41 a 60 | 60,45 | 128 | 2,5 | 45,48 | 1,98 | 4,40 % |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.4: Tensiones de ruptura en ensayo de impulso para Aceite con ácido oleico desgasificado.

| Impulsos | V_{ac} [kV] | V1 [kV] | I_1 [A] | V_{imp} [kV] | σ [kV] | ϵ % |
|----------|---------------|---------|-----------|----------------|---------------|--------------|
| 1 a 20 | 60,39 | 128 | 2,5 | 52,82 | 2,97 | 5,63 % |
| 21 a 40 | 60,19 | 128 | 2,5 | 55,11 | 2,22 | 4,26 % |
| 41 a 60 | 60,42 | 128 | 2,4 | 52,04 | 1,71 | 3,40 % |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.5: Tensiones de ruptura en ensayo de impulso para nanofluido con concentración de 10[mg/L] desgasificado.

| Impulsos | V_{ac} [kV] | V1 [kV] | I_1 [A] | V_{imp} [kV] | σ [kV] | ϵ % |
|----------|---------------|---------|-----------|----------------|---------------|--------------|
| 1 a 20 | 60,12 | 128 | 2,5 | 55,71 | 2,67 | 5,79 % |
| 21 a 40 | 60,37 | 128 | 2,5 | 55,97 | 2,79 | 4,99 % |
| 41 a 60 | 60,13 | 128 | 2,4 | 55,5 | 3,64 | 6,60 % |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.6: Tensiones de ruptura en ensayo de impulso para nanofluido con concentración de 30[mg/L] desgasificado.

| Impulsos | V_{ac} [kV] | V_1 [kV] | I_1 [A] | V_{imp} [kV] | σ [kV] | ϵ % |
|----------|---------------|------------|-----------|----------------|---------------|--------------|
| 1 a 20 | 60,27 | 128 | 2,5 | 57,15 | 3,68 | 6,40 % |
| 21 a 40 | 60,01 | 128 | 2,5 | 57,31 | 3,32 | 5,80 % |
| 41 a 60 | 60,45 | 128 | 2,4 | 57,22 | 2,93 | 5,12 % |

Fuente: Elaboración propia.

6.2.2. Tangente delta

A continuación, se presentan los datos obtenidos mediante el ensayo de factor de disipación.

Tabla 6.7: Medición tangente delta, capacitancia, resistividad y permitividad de aceite desgasificado.

| Medida | Medición 1 | Medición 2 | Variación |
|----------------------|------------------------|----------------------|-----------|
| tg [%] | 0,262618 | 0,254723 | 3,01 % |
| Capacitancia [pF] | 172,2 | 172,3 | 0,06 % |
| Resistividad [ohm/m] | $3,1683 \cdot 10^{10}$ | $3,32 \cdot 10^{10}$ | 4,94 % |
| Permitividad | 2,084 | 2,084 | 0,00 % |

Tabla 6.8: Medición tangente delta, capacitancia, resistividad y permitividad de aceite con ácido oleico desgasificado.

| Medida | Medición 1 | Medición 2 | Variación |
|----------------------|------------------------|------------------------|-----------|
| tg [%] | 0,305765 | 0,290184 | 5,10 % |
| Capacitancia [pF] | 173,9 | 174 | 0,06 % |
| Resistividad [ohm/m] | $8,4056 \cdot 10^{10}$ | $8,7664 \cdot 10^{10}$ | 4,29 % |
| Permitividad | 2,106 | 2,106 | 0,00 % |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.9: Medición tangente delta, capacitancia, resistividad y permitividad de Nanofluido a 10 [mg/L] desgasificado.

| Medida | Medición 1 | Medición 2 | Variación |
|----------------------|------------------------|------------------------|-----------|
| tg [%] | 0,303673 | 0,294575 | 3,00 % |
| Capacitancia [pF] | 173,9 | 173,9 | 0,00 % |
| Resistividad [ohm/m] | $8,7884 \cdot 10^{11}$ | $9,0340 \cdot 10^{11}$ | 2,80 % |
| Permitividad | 2,105 | 2,105 | 0,00 % |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.10: Medición tangente delta, capacitancia, resistividad y permitividad de Nano-fluido a 30 [mg/L] desgasificado.

| Medida | medición 1 | medición 2 | variación |
|----------------------|------------------------|------------------------|-----------|
| tg [%] | 0,309521 | 0,307519 | 0,65 % |
| Capacitancia [pf] | 174,1 | 174 | 0,06 % |
| Resistividad [ohm/m] | $8,9840 \cdot 10^{11}$ | $9,0459 \cdot 10^{11}$ | 0,69 % |
| Permitividad | 2,107 | 2,106 | 0,05 % |

Fuente: Elaboración propia.

Bibliografía

- [1] M. Wang, A.J. Vandermaar y K.D. Srivastava. «Review of condition assessment of power transformers in service». En: *IEEE Electrical Insulation Magazine* (2002).
- [2] B. Saprling. «Transformer monitoring and diagnostics». En: *IEEE Power Engineering Society*. Vol. 2. 1999, págs. 978-980.
- [3] R. Murugan y R. Ramasamy. «Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities». En: *Engineering Failure Analysis* 55 (2015), págs. 182-192.
- [4] Engineering, Thermal. *Aceite para Transformadores / Usos en Aislamiento Eléctrico y Enfriamiento*. [Último acceso: 02 Junio 2024]. 2024. URL: <https://www.thermal-engineering.org/es/aceite-para-transformadores-usos-en-aislamiento-electrico-y-enfriamiento/#:~:text=Aceite%20Mineral%3A%20Derivado%20del%20petr%C3%B3leo%2C%20el%20aceite%20mineral,el%20riesgo%20de%20contaminaci%C3%B3n%20en%20caso%20de>.
- [5] D. Strauss. *Energética Hoy Soluciones Eco-lógicas*. [Último acceso: 02 Junio 2024]. 22 de nov. de 2021. URL: <https://www.energetica hoy.com/post/2018/03/10/el-aceite-vegetal-como-diel%C3%A9ctrico-una-soluci%C3%B3n-rentable-y-ecol%C3%B3gica>.
- [6] S.U.S. Choi y Jeffrey Eastman. «Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles». En: *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* 66 (ene. de 1995).
- [7] T. Tsovilis et al. «Exploring the surge current degradation of natural ester oil-based nanofluids». En: *Scientific Reports* 11 (2024).
- [8] M. Suhaimi et al. «Experimental and statistical investigation on the dielectric breakdown of magneto nanofluids for power applications». En: *Journal of Materials Science: Materials in Engineering* 19 (2022), págs. 5-31. URL: https://www.researchgate.net/publication/360019205_Experimental_and_statistical_investigation_on_the_dielectric_breakdown_of_magneto_nanofluids_for_power_applications.
- [9] Muhammad Rafiq et al. «Transformer oil-based nanofluid: The application of nanomaterials on thermal, electrical and physicochemical properties of liquid insulation— A review». En: *Ain Shams Engineering Journal* 12.1 (2021), págs. 555-576. DOI: 10.1016/j.asej.2020.08.010.
- [10] Alfio Zambon y Mariana Córdoba. «Nanomaterials and Intertheoretical Relations: Macro and Nanochemistry as Emergent Levels». En: *Foundations of Science* 2 (2021), págs. 355-370. DOI: 10.1007/s10699-020-09723-8.

- [11] Chintamani Nagesa Ramachandra Rao, Achim Müller y Anthony K Cheetham. *The chemistry of nanomaterials: synthesis, properties and applications*. John Wiley & Sons, 2006.
- [12] Ibrahim Khan, Khalid Saeed e Idrees Khan. «Nanoparticles: Properties, applications and toxicities». En: *Arabian Journal of Chemistry* 12.7 (2020), págs. 908-931.
- [13] Yimin Xuan y Qiang LI. «Investigation on Convective Heat Transfer and flow Features of Nanofluids». En: *Nanjing University of Science Technology* (2003), págs. 1-5. DOI: 10.1115/1.1532008.
- [14] Habib Ben Bacha et al. «A comprehensive review on nanofluids: Synthesis, cutting-edge applications, and future prospects». En: *International Journal of Thermofluids* 22 (2024). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100595>.
- [15] International Electrotechnical Commission. «High-voltage test techniques – Partial discharge measurements». En: *IEC Standard 60270 3* (2000), págs. 1-79.
- [16] Pía Francisca Reyes González. «Influencia de la frecuencia de integración de la carga aparente y de la impedancia de detección en la medición de descargas parciales». Tesis de Pregrado. Universidad Técnica Federico Santa María, 2021. URL: <https://hdl.handle.net/11673/50497>.
- [17] Jorge Alfredo Ardila Rey. «Separación de fuentes de descargas parciales y ruido eléctrico mediante análisis de potencia espectral en alta frecuencia». Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid, 2016.
- [18] *High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements*. International Electrotechnical Commission, 2010.
- [19] International Electrotechnical Commission. *Insulating Liquids - Measurement of Relative Permittivity, Dielectric Dissipation Factor (tan δ) and DC Resistivity*. IEC, 2004. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/4124>.
- [20] R. K. Sahu, P. K. Dutta y B. Gupta. «Nanoparticles for Enhancing Transformer Oil Dielectric Strength». En: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 24.3 (2017), págs. 1674-1682.
- [21] Terco. *Introduction to High Voltage Experiments*. Terco, 2011.
- [22] *IEC 60156:2018 Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method*. Revises IEC 60156:1995. 2018. URL: <https://www.iec.ch/60156>.
- [23] M. Rizwan et al. «Experimental and Statistical Investigation on the Dielectric Breakdown of Magneto Nanofluids for Power Applications». En: *Journal of Materials Science: Materials in Engineering* 19.5 (2024).
- [24] Megger Group. *The Megger Guide to Insulating Oil Dielectric Breakdown Testing*. A comprehensive guide covering testing standards and best practices for dielectric breakdown voltage in insulating oils. Megger, 2020. URL: <https://www.megger.com>.
- [25] M. H. Chi, Q. G. Chen, H. L. Liu et al. «Breakdown Characteristics of Oil-Pressboard Insulation under Compound Electric Field». En: *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (2013), págs. 817-819.
- [26] Y. F. Du et al. «Effect of TiO₂ nanoparticles on the breakdown strength of transformer oil». En: *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. IEEE. 2010, págs. 1-3.

- [27] Yu-zhen Lv et al. «Experimental investigation of breakdown strength of mineral oil-based nanofluids». En: *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*. IEEE, 2021, págs. 1-3.
- [28] Jorge Alfredo Ardila-Rey et al. «A Novel E-Nose System for the Characterization of Dissolved Gases in Dielectric Oils». En: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 72 (2023), págs. 1-16. DOI: 10.1109/TIM.2023.3307177. URL: <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3307177>.
- [29] Bekir Mumyalmaz y Kerim Karabacak. «Diagnosis of power transformer incipient faults using electronic nose». En: *International Conference on Engineering and Natural Science*. Mayo de 2016. URL: <https://www.researchgate.net/publication/203738377>.
- [30] *Mineral Oil-Impregnated Electrical Equipment in Service – Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis*. Standard for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers. International Electrotechnical Commission, 2007. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6020>.
- [31] ASTM International. *Standard Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids*. ASTM International, 2022. URL: <https://www.astm.org/d0924-22.html>.
- [32] Pavan M. V. Raja y Andrew R. Barron. *Espectroscopia UV-Visible*. Publicado bajo licencia CC BY 4.0. 2024. URL: <https://espanol.libretexts.org/@go/page/71089>.
- [33] Olivier Thomas y Christopher Burgess. *UV-VISIBLE Spectrophotometry of Waters and Soils*. 3rd. Rennes, France: Elsevier, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90994-5.00012-5>.
- [34] Samarpan Deb Majumder y Ankit Das. «A short review of organic nanofluids: Preparation, surfactants, and applications». En: *frontiers in Material* 8 (2021). DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.630182>.
- [35] Dattatray Ramchandra Naik et al. «Experimental and Statistical Investigation on the Dielectric Breakdown of Magneto Nanofluids for Power Applications». En: *Protection and Control of Modern Power Systems* 9.1 (2024), págs. 1-16. DOI: 10.1186/s40712-024-00144-0.
- [36] Sergi Torres Araya et al. «Performance assessment of machine learning techniques in electronic nose systems for power transformer fault detection». En: *Energy and AI* 20 (2025), pág. 100497. ISSN: 2666-5468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100497>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666546825000291>.