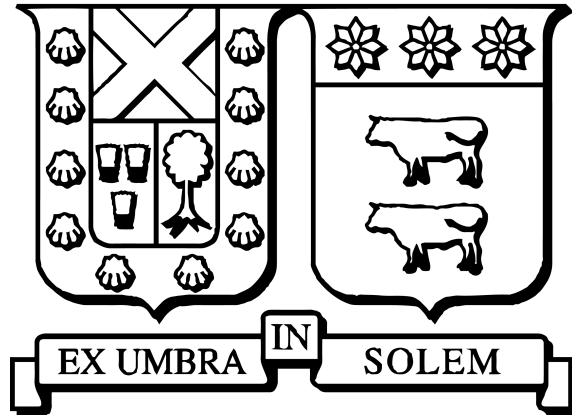




Evaluación del nanofluido aceite/ $NiCo_2O_4$ como alternativa para su uso como dieléctrico en transformadores de potencia

JOAQUÍN ARTURO VÁSQUEZ MANSILLA

2025

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Civil Electricista

Profesor Guía:
Prof. Leonardo Vivas (UTFSM)

Comisión:
Prof. Jorge Ardila (UTFSM)

Santiago, 16/08/2025.



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Evaluación del nanofluido aceite/ $NiCo_2O_4$ como alternativa para su uso como dieléctrico en transformadores de potencia

Nombre del candidato(a): Joaquín Arturo Vásquez Mansilla

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Electricista

Campus: Santiago San Joaquín ; **Departamento:** Departamento de Ingeniería Eléctrica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Leonardo Vivas, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

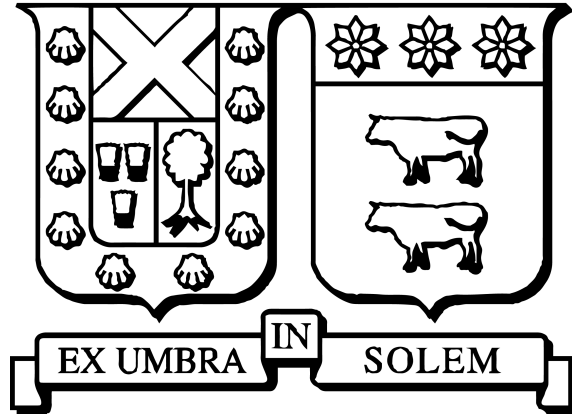
Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 12/09/2025 ; **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 12/09/2025 ; **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



Evaluación del nanofluido aceite/ $NiCo_2O_4$ como alternativa para su uso como dieléctrico en transformadores de potencia

JOAQUÍN ARTURO VÁSQUEZ MANSILLA

2025

“La imaginación es más importante que el conocimiento.”
— *Albert Einstein*

Agradecimientos

Después de tanto tiempo en este proceso, el cual fue muy duro y desafiante, solo tengo palabras de agradecimiento.

Primero, a mi familia. A mis padres, Sandra y Cristian, quienes siempre me brindaron su apoyo incondicional en los momentos difíciles. Me hacían recordar que debía tener confianza en mis conocimientos y habilidades, porque ellas me llevarán a cumplir mis objetivos. A mi hermana Javiera, gracias por escucharme cuando necesitaba desahogarme, por acompañarme en tantas noches de estudio y por tu cariño incondicional.

No quiero olvidar de agradecer a mis profesores, quienes a lo largo de mi formación compartieron sus conocimientos y creyeron en mis capacidades. En especial a mi profesor guía, Leonardo Vivas, y a mi amigo Pablo Saldaño, quienes fueron fundamentales en esta última etapa de la universidad. Gracias por su guía, tiempo, paciencia y por tenderme la mano en los momentos donde no sabía cómo seguir avanzando.

Agradezco profundamente a toda mi familia, a mis sobrinos, primos, tíos y abuelos, porque son lo más importante que tengo. Las risas que hemos compartido me ayudaron en los momentos difíciles, y sus enseñanzas me han hecho el hombre que soy hoy en día.

No puedo dejar fuera a dos personas que son muy importantes para mí: Felipe Cortés y Rodrigo Espinoza. Ustedes también son parte de este logro. En los momentos difíciles siempre estuvieron para aconsejarme y apoyarme. En mi memoria siempre estarán las risas y todos los momentos compartidos. De niño quería tener un hermano, pero la vida regaló a dos. y no podría estar más agradecido por ello.

Finalmente, al mirar hacia atrás y pensar en todo lo vivido en la universidad, solo siento una gran alegría. Tuve suerte de conocer a personas maravillosas, que hoy llamo amigos. Con ustedes compartí tanto los buenos como los malos momentos, que ahora solo son anécdotas que recordamos entre risas. Gracias por enseñarme el verdadero significado de compañerismo y amistad. Siempre estaré agradecido por la mano que me tendieron cuando más lo necesité. Los llevaré siempre en mi corazón.

Índice de contenidos

Índice de contenidos	I
Índice de figuras	III
Índice de tablas	V
Resumen	1
Abstrac	2
1. Introducción	3
1.1. Objetivos	5
1.1.1. Objetivo general	5
1.1.2. Objetivos específicos	5
2. Estado del arte	6
2.1. Nanopartículas	6
2.2. Nanofluidos	8
2.3. Pruebas en nanofluidos	10
2.3.1. Descargas parciales	10
2.3.1.a. Descargas parciales internas	11
2.3.1.b. Descargas parciales Superficiales	12
2.3.1.c. Descargas parciales tipo corona	13
2.3.2. Descargas tipo impulso	13
2.3.2.a. Ensayo impulso tipo rayo	14
2.3.2.b. Impulso tipo rayo con corte en el frente	15
2.3.2.c. Impulso tipo rayo con corte en la cola	16
2.3.2.d. Circuito generador de tipo impulso	17
2.3.3. Rigidez dieléctrica	18
2.3.4. Espectroscopía UV-Visible	19
2.3.5. Tangente delta	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. Espectrofotometría UV-Visible	26
3.5. Montaje Impulso	27
3.6. Tangente Delta	29

4. Análisis y Resultados	31
4.1. Nanopartículas	31
4.2. Rigidez Dieléctrica	32
4.3. UV-Visible	33
4.4. Descargas parciales impulso tipo rayo	36
4.5. Tangente Delta	42
5. Conclusiones	45
6. Anexos	47
6.1. Rigidez Dielectrica	47
6.2. UV-Visible	48
6.3. Impulso tipo rayo	48
6.4. Tangente delta	53

Índice de figuras

2.1.	Desglose de los métodos de sinterización de NPs con enfoque Bottom-up y Top-Down.	7
2.2.	Método <i>One-step</i> .	8
2.3.	Método <i>Two-step</i> .	9
2.4.	Descarga parcial resultante bajo tensión alterna.	11
2.5.	Ejemplos de descargas parciales internas.	12
2.6.	Ejemplos de descargas parciales superficiales.	12
2.7.	Ejemplos de descargas parciales tipo corona.	13
2.8.	Forma de onda estándar de un impulso tipo rayo.	14
2.9.	Forma de onda de un impulso tipo rayo con corte en el frente.	16
2.10.	Forma de onda de un impulso tipo rayo con corte en la cola.	16
2.11.	Circuito generador con resistencia en serie.	18
2.12.	Circuito generador con resistencia en paralelo.	18
2.13.	Espectro electromagnético.	19
2.14.	Zona del espectro visible perceptible por el ojo humano.	19
2.15.	Circuito equivalente que modela un sistema aislante.	21
2.16.	Diagrama fasorial del circuito equivalente.	21
3.1.	Proceso de sinterización de la nanopartícula de $NiCo_2O_4$.	22
3.2.	Nanopartícula resultante $NiCo_2O_4$.	23
3.3.	Proceso de sintetización de nanofluido aceite/ $NiCo_2O_4$.	24
3.4.	Equipo BAUR DPA 75 C para ensayo en aceites aislantes.	25
3.5.	Celda sin agitador para muestras del BAUR DPA 75 C.	25
3.6.	Celda con electrodos esféricos.	25
3.7.	Celda con electrodos parcialmente esféricos.	25
3.8.	Celda con agitador para muestras del BAUR DPA 75 C.	26
3.9.	Espectrofotómetro utilizado en el ensayo de espectroscopía visible.	26
3.10.	Viales de vidrio utilizados para contener las muestras a estudiar.	26
3.11.	Heptano utilizado como referencia en blanco.	27
3.12.	Circuito utilizado para ensayos de tipo impulso.	28
3.13.	Objeto de ensayo punta-plano utilizado para ensayo impulso tipo rayo.	29
3.14.	Equipo <i>TOR-3 LSL</i> utilizado para la medición del factor de disipación dieléctrico ($tg \delta$).	30
4.1.	Imagen TEM de la nanopartícula $NiCo_2O_4$ a una escala de 50 [nm].	31
4.2.	Imagen TEM de la nanopartícula $NiCo_2O_4$ a una escala de 50 [nm].	31
4.3.	Imagen TEM de la nanopartícula $NiCo_2O_4$ a una escala de 20 [nm].	32
4.4.	Imagen TEM de la nanopartícula $NiCo_2O_4$ a una escala de 20 [nm].	32
4.5.	Difractograma de rayos X de la nanopartícula $NiCo_2O_4$.	32

4.6.	Gráfico de absorbancia vs. longitud de onda en ensayo UV-Visible obtenido tras el ensayo.	34
4.7.	Gráfico de absorbancia vs. longitud de onda en el rango de 325 a 380 [nm].	35
4.8.	Gráfico de absorbancia vs. longitud de onda en el rango de 880 a 980 [nm].	35
4.9.	Tensiones de ruptura promedio para 20, 40 y 60 impulsos tipo rayo. Las tensiones reales son de polaridad negativa; sin embargo, se presentan en valor absoluto para facilitar la visualización comparativa entre las distintas muestras.	37
4.10.	Coefficiente de variación porcentual de las tensiones de ruptura promedio para 20, 40 y 60 impulsos tipo rayo.	38
4.11.	Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra de aceite limpio.	38
4.12.	Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra con ácido oleico.	39
4.13.	Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra de nanofluido con concentración de 40 [mg/L], imagen realizada a través de Inteligencia Artificial.	40
4.14.	Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra de nanofluido con concentración de 40 [mg/L].	40
4.15.	Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra de nanofluido con concentración de 10 [mg/L], impulso N° 1.	41
4.16.	Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra de nanofluido con concentración de 10 [mg/L], impulso N° 1, imagen realizada a través de Inteligencia Artificial.	41
4.17.	Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra de nanofluido con concentración de 10 [mg/L], impulso N° 56.	42
4.18.	Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra de nanofluido con concentración de 10 [mg/L], impulso N° 1, imagen realizada a través de Inteligencia Artificial.	42
4.19.	Datos de tangente δ para diferentes fluidos dieléctricos.	43
4.20.	Datos de resistividad relativa para diferentes fluidos dieléctricos.	44

Índice de tablas

3.1.	Parámetros geométricos y eléctricos para electrodos en ensayos de rigidez dieléctrica.	25
4.1.	Condiciones ambientales para ensayo de Rigidez Dieléctrica.	33
4.2.	Rigidez dieléctrica para muestras utilizadas.	33
4.3.	Condiciones ambientales durante el ensayo de impulso tipo rayo.	36
4.4.	Condiciones ambientales durante el ensayo de tangente δ o factor de disipación.	43
6.1.	Resultados de tensión de ruptura, promedio, desviación estándar y desviación porcentual para cada fluido.	47
6.2.	Resultados de tensión de ruptura para seis pruebas distintas de Aceite Mineral.	48
6.3.	Tensiones de ruptura para muestra de Aceite Limpio.	48
6.4.	Análisis estadístico de la tensión de ruptura para aceite limpio.	49
6.5.	Tensiones de ruptura para muestra de Aceite Limpio en la 2 ^{da} prueba.	49
6.6.	Análisis estadístico de la tensión de ruptura para Aceite Limpio en la 2 ^{da} prueba.	49
6.7.	Tensiones de ruptura para muestra de Aceite con Ácido Oleico.	50
6.8.	Análisis estadístico de la tensión de ruptura para aceite con ácido oleico.	50
6.9.	Tensiones de ruptura para muestra de Aceite con Ácido Oleico en la 2 ^{da} prueba.	51
6.10.	Análisis estadístico de la tensión de ruptura para Aceite + Ácido Oleico en la 2 ^{da} prueba.	51
6.11.	Tensiones de ruptura para muestra de NanoFluido 10 [mg/L].	52
6.12.	Análisis estadístico de la tensión de ruptura para NanoFluido 10 [mg/L].	52
6.13.	Tensiones de ruptura para muestra de NanoFluido 40 [mg/L].	53
6.14.	Análisis estadístico de la tensión de ruptura para NanoFluido 40 [mg/L].	53
6.15.	Valores de tangente delta ($\text{tg } \delta$) para diferentes muestras.	53
6.16.	Resistividad Relativa [Ohm/m] para diferentes muestras.	54

Resumen

En el sistema eléctrico de potencia, los transformadores constituyen un elemento crítico para garantizar la continuidad y estabilidad del suministro. Estos dispositivos están diseñados para funcionar continuamente por 20 o 35 años, lograr una prolongación de la vida útil de los transformadores de potencia implicarían un ahorro cuantioso que beneficiaría a la industria y a los consumidores. A pesar de que los transformadores presentan una baja tasa de falla global, entre un 1 y un 2 %, aproximadamente el 41 % de los siniestros registrados afectan al sistema de aislamiento, el cual se compone de dos elementos principales: aislamiento sólido y aislamiento líquido (aceites vegetales y minerales). Debido a esto, es relevante el estudio de materiales dieléctricos que puedan evitar a largo plazo fallas en los transformadores, en la actualidad se ha trabajado en incluir nanopartículas en los aceites dieléctricos de dichos equipos, creando así un nanofluido, el cual presenta características mejoradas que podrían ser un aporte en la prolongación de la vida útil del dispositivo. En el presente trabajo se investigaron las propiedades dieléctricas de un nanofluido formulado a partir de aceite mineral como base y una concentración de 10 y 40 [mg/L] de nanopartículas de $NiCo_2O_4$. De acuerdo con estudios previos, estas nanopartículas presentan un tamaño aproximado de 20 [nm] y una morfología cuasi-esférica. Además, mediante análisis de difracción de rayos X, se comprobó que posee una alta pureza.

Para evaluar la viabilidad del nanofluido como fluido aislante en transformadores de potencia, se realizaron diversos ensayos experimentales, como son el ensayo de rigidez dieléctrica, espectroscopía UV-Visible, impulso tipo rayo y tangente delta, estos permitieron caracterizar su comportamiento eléctrico. Donde se observaron mejoras en la rigidez dieléctrica en las muestras que contenían nanopartículas, destacando particularmente aquella con la mayor concentración de $NiCo_2O_4$ (40 [mg/L]). No obstante, en los ensayos de impulso tipo rayo, los mejores resultados se obtuvieron con la muestra de 10 [mg/L], lo que evidencia que una mayor concentración no siempre implica un mejor rendimiento, y que existe un punto óptimo en la concentración de nanopartículas dependiendo de la propiedad evaluada. En cuanto a las propiedades ópticas del nanofluido, se determinó que la adición de nanopartículas incrementa la absorbancia en comparación con el fluido base.

Con base en estos resultados, se concluye que los nanofluidos mejoran las propiedades dieléctricas del fluido base; sin embargo, es crucial identificar una concentración óptima de nanopartículas, ya que una dosificación excesiva puede comprometer el desempeño del aislante.

Abstract

In the power electrical system, transformers are a critical element to ensure the continuity and stability of the supply. These devices are designed to operate continuously for 20 to 35 years, and achieving an extension of the service life of power transformers would imply significant savings that would benefit both the industry and consumers. Although transformers exhibit a low overall failure rate, between 1 and 2 %, approximately 41 % of reported failures affect the insulation system, which consists of two main components: solid insulation and liquid insulation (vegetable and mineral oils).

Due to this, the study of dielectric materials that can prevent transformer failures in the long term is highly relevant. Recently, research has focused on incorporating nanoparticles into the dielectric oils of these devices, thus creating a nanofluid, which exhibits enhanced properties that could contribute to extending the service life of the equipment. In this work, the dielectric properties of a nanofluid formulated from mineral oil as a base and a concentration of 10 and 40 [mg/L] of $NiCo_2O_4$ nanoparticles were investigated. According to previous studies, these nanoparticles have an approximate size of 20 [nm] and a quasi-spherical morphology. In addition, X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed their high purity.

To evaluate the feasibility of using the nanofluid as an insulating fluid in power transformers, several experimental tests were carried out, including dielectric strength testing, UV-Visible spectroscopy, lightning impulse tests, and dissipation factor (delta tangent) measurements, which allowed the characterization of its electrical behavior. Improvements in dielectric strength were observed in the samples containing nanoparticles, particularly in the one with the highest $NiCo_2O_4$ concentration (40 [mg/L]). However, in the lightning impulse tests, the best results were obtained with the 10 [mg/L] sample, showing that a higher concentration does not always lead to better performance and that there is an optimal nanoparticle concentration depending on the evaluated property. Regarding the optical properties of the nanofluid, it was determined that the addition of nanoparticles increases absorbance compared to the base fluid.

Based on these results, it is concluded that nanofluids improve the dielectric properties of the base fluid; however, it is crucial to identify an optimal nanoparticle concentration, as an excessive dosage may compromise the performance of the insulating fluid.

Capítulo 1

Introducción

En el sistema energético interconectado moderno, uno de los equipos más esenciales para su correcto funcionamiento es el transformador. Estos dispositivos poseen una vida útil estimada entre 20 y 35 años. Es importante considerar que el tipo y frecuencia del mantenimiento dependerán del estado del transformador, ya que con el paso del tiempo estos equipos se vuelven más propensos a fallas, las cuales representan riesgos significativos tanto para el personal como para el medio ambiente [1].

Los diversos componentes que conforman un transformador están expuestos a esfuerzos mecánicos, eléctricos y térmicos constantes, dependiendo de su función y ubicación dentro del sistema. Las fallas internas son especialmente críticas, ya que representan entre un 70 y 80 % del total de fallas registradas en estos equipos. Las causas principales incluyen conexiones flojas, fallas dieléctricas, humedad, impactos de rayos, rupturas eléctricas, sobrecargas y procedimientos de mantenimiento incorrectos [2].

Un estudio que analizó un conjunto amplio de fallas en transformadores reveló que el 41 % de las anomalías afectaban el sistema de aislamiento, el cual se clasifica en sólido y líquido. En el caso del aislamiento líquido, las principales causas de falla corresponden a la oxidación, la descomposición térmica del aceite y la contaminación por humedad [3]. El aceite aislante constituye uno de los elementos más fundamentales en un transformador, ya que cumple una doble función: actúa como medio dieléctrico y también como refrigerante durante el prolongado tiempo de operación de estos equipos [4].

Diversos estudios han señalado que la vida útil del transformador está estrechamente relacionada con la durabilidad del sistema de aislamiento, razón por la cual resulta prioritario implementar estrategias de monitoreo y diagnóstico oportuno, permitiendo así extender su funcionamiento [1].

Con el objetivo de mejorar las propiedades químicas, físicas y térmicas del aceite, se ha impulsado el estudio e implementación de nanofluidos, formados por aceite y nanopartículas. Esta técnica consiste en combinar un líquido base de baja conductividad térmica con nanopartículas que posean alta conductividad, logrando así un fluido con propiedades térmicas, eléctricas, químicas y físicas superiores [4].

Los nanofluidos presentan ventajas destacables como una mayor conductividad térmica, una elevada tasa de transferencia de calor y una mejor convección térmica. Sin embargo, también enfrentan desventajas tales como el aumento de la viscosidad y la posibilidad de sedimentación o aglomeración de las nanopartículas. Para evitar esto, se emplean sur-

factantes que ayudan a mantener las partículas dispersas, aunque su cantidad debe ser cuidadosamente controlada, ya que puede afectar negativamente la conductividad térmica del fluido [4].

Además, los nanofluidos pueden ofrecer una mayor tensión de ruptura, menor presencia de descargas parciales y mejor resistencia frente a la radiación, en comparación con los fluidos convencionales. No obstante, su desempeño se puede ver limitado por factores como la estabilidad a largo plazo, el envejecimiento térmico y la oxidación. A través de diferentes ensayos, se ha demostrado que las nanopartículas permiten mejorar la resistencia del fluido frente a sobrecargas, posicionando a los nanofluidos como una alternativa prometedora para fortalecer la sostenibilidad y resiliencia del sistema eléctrico [5].

En la búsqueda por mejorar la conducción térmica en transformadores, se han estudiado nanopartículas metálicas con elevada conductividad térmica. Diversas investigaciones han evidenciado que la incorporación de nanopartículas en fluidos convencionales (como agua o aceite) provoca un incremento significativo de la conductividad térmica, mejorando así la eficiencia sin elevar el consumo energético [6].

Este tipo de resultados ha abierto el camino para nuevas investigaciones y aplicaciones en sistemas de refrigeración basados en nanofluidos. Asimismo, estudios posteriores han determinado que los nanofluidos formulados con aceites de base éster natural presentan una mejora en su capacidad para soportar sobrecargas. Sin embargo, una concentración excesiva de nanopartículas puede deteriorar las propiedades dieléctricas, superando incluso las ventajas del fluido base. También se ha constatado que la permitividad relativa y la estabilidad dieléctrica de estos fluidos se vuelven más robustas frente al envejecimiento [7].

Entre las nanopartículas con mejores resultados destacan las de tipo conductor, como el Fe_3O_4 , las cuales mejoran la resistencia dieléctrica del nanofluido y su comportamiento ante descargas tipo impulso, al optimizar la distribución del campo eléctrico aplicado [8]. También se han investigado nanopartículas semiconductoras, como el TiO_2 , dispersadas en aceite mineral. Los resultados muestran una mejora considerable en la rigidez dieléctrica tanto en corriente alterna como en impulsos, en comparación con el aceite base [9]. El presente estudio aborda la síntesis y caracterización de un nanofluido formulado a partir de aceite mineral y nanopartículas de $NiCo_2O_4$, con el objetivo de evaluar sus propiedades dieléctricas frente al fluido base. Para ello, se analizaron seis tipos de muestras: aceite mineral limpio, aceite con ácido oleico (10% en volumen) y nanofluidos con concentraciones de 10 y 40 [mg/L]. La síntesis de las nanopartículas se realizó mediante métodos orgánicos utilizando *Crinodendron Patagua*, debido a que es rico en compuesto fenólicos/taninos, aportando propiedades estabilizantes y siendo un agente limitador del crecimiento, permitiendo mantener un control en el tamaño de la nanopartícula y minimizando el uso de productos químicos peligrosos, mientras que la formulación del nanofluido se efectuó mediante el método de dos pasos (*two-step*).

Finalmente, para evaluar las propiedades dieléctricas se realizaron pruebas de rigidez dieléctrica, impulso tipo rayo, espectroscopía UV-Visible y factor de disipación o tangente δ , con el fin de determinar si la inclusión de nanopartículas y su concentración mejoran el comportamiento eléctrico del fluido frente a esfuerzos dieléctricos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- Evaluar el rendimiento del nanofluido aceite/ $NiCo_2O_4$ como medio dieléctrico en transformadores de potencia, comparando sus propiedades dieléctricas con las del fluido base.

1.1.2. Objetivos específicos

- Sintetizar el nanofluido aceite/ $NiCo_2O_4$ mediante la combinación de nanopartículas de $NiCo_2O_4$ y aceite mineral, variando la concentración de nanopartículas y asegurando la estabilidad del fluido.
- Evaluar el comportamiento dieléctrico del nanofluido aplicando normativas IEC o ASTM, mediante ensayos de tangente delta, rigidez dieléctrica y de impulsos tipo rayo.
- Inspeccionar la estabilidad, en el tiempo, del nanofluido mediante medidas ópticas, utilizando espectroscopia UV-Visible.
- Comparar las propiedades dieléctricas del nanofluido frente al aceite mineral base, identificando mejoras o diferencias en su desempeño como medio dieléctrico en transformadores de potencia.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Nanopartículas

Las nanopartículas (NPs) son partículas estudiadas en el ámbito de la nanociencia que, por definición, presentan al menos una dimensión dentro del rango de 1 a 100 [nm]. En la literatura especializada, se ha debatido ampliamente la relación entre la química molecular, la macroquímica y la nanoquímica. Esta última representa un nivel intermedio, ya que los objetos de estudio poseen tanto propiedades individuales como características químicas específicas propias de la materia. Debido a esto, las NPs no pueden ser clasificadas exclusivamente dentro del dominio macroquímico ni microquímico [10].

Para la síntesis de nanopartículas existen dos enfoques ampliamente utilizados: *top-down* y *bottom-up*. A continuación, se describen los métodos asociados a cada uno de estos enfoques (como se muestra en la Figura 2.1).

En el enfoque *top-down*, que consiste en reducir sólidos de gran tamaño a estructuras más pequeñas, se encuentran los siguientes métodos:

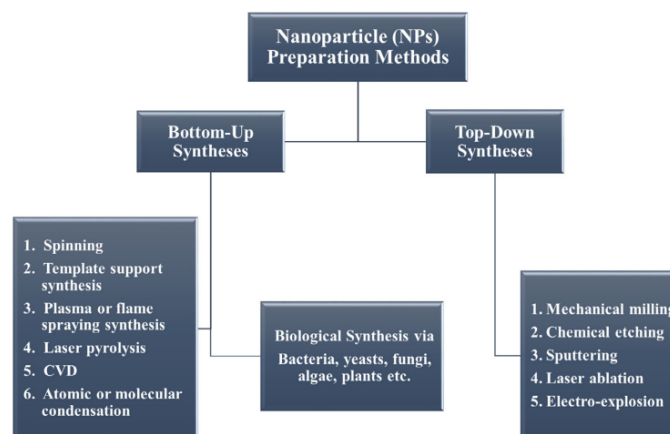
- Evaporación térmica.
- Depósito químico en fase vapor (CVD).
- Preparación de cúmulos gaseosos.
- Implantación de iones.
- Molienda mecánica de alta energía.

Por otra parte, el enfoque *bottom-up* se basa en la condensación controlada de átomos o moléculas, permitiendo la construcción progresiva de las nanopartículas. Los métodos correspondientes son:

- Método coloidal.
- Reducción fotoquímica y radioquímica.
- Radiación de microondas.

- Uso de dendrímeros.
- Síntesis solvotérmica.
- Método sol-gel.

Figura 2.1. Desglose de los métodos de sinterización de NPs con enfoque *Bottom-up* y *Top-Down*.



Fuente: *Nanoparticles: Properties, applications and toxicities* [11].

De ambos enfoques, el más empleado en la actualidad es el *bottom-up*, principalmente debido a su menor costo comparativo frente al *top-down*, además de ofrecer un mayor control sobre las características morfológicas y estructurales de las NPs sintetizadas [10]. Es fundamental dominar los procesos de síntesis de nanopartículas, ya que el tamaño de estas influye directamente en la evolución de propiedades clave del nanomaterial resultante, tales como las características estructurales, termodinámicas, electrónicas, espectroscópicas, electromagnéticas y químicas [12].

Las nanopartículas pueden clasificarse según distintos criterios, lo que resulta esencial para comprender y optimizar sus propiedades y aplicaciones. Por ejemplo, su clasificación influye en aspectos como la conductividad eléctrica, la eficiencia catalítica o la resistencia mecánica en sistemas como los nanofluidos. A continuación, se presentan las categorías más comunes [11]:

- **Composición química:**
 - a. **Inorgánicas:** metales, óxidos metálicos y semiconductores.
 - b. **Orgánicas:** polímeros naturales o sintéticos.
 - c. **Híbridas:** combinaciones de compuestos orgánicos e inorgánicos.
- **Morfología:** incluye nanopartículas esféricas, tubos, varillas, placas y estructuras huecas.
- **Origen:**
 - a. **Naturales:** presentes en organismos, como proteínas o virus.
 - b. **Sintéticas:** generadas mediante métodos físicos, químicos o biotecnológicos.

- **Fases:**

- a. **Monofásicas:** constituidas por un solo tipo de material.
- b. **Multifásicas:** compuestas por más de un tipo de material.

2.2. Nanofluidos

Los nanofluidos (NFs) son sustancias compuestas por un fluido base en el cual se encuentran suspendidas nanopartículas sólidas con alta conductividad térmica, cuyo tamaño se encuentra típicamente en el rango de 1 a 100 [nm]. Estas nanopartículas pueden corresponder a metales, óxidos, no metales, carburos metálicos o nanotubos de carbono, y su inclusión tiene como objetivo mejorar la transferencia de calor del sistema en comparación con el fluido base.

La síntesis de nanofluidos puede realizarse mediante dos métodos principales: el método *one-step* (un paso) y el método *two-step* (dos pasos). En el método *one-step*, la formación de las nanopartículas y su dispersión en el fluido base ocurren en un único proceso, como se muestra en la Figura 2.2. En cambio, el método *two-step* consiste en la síntesis previa de las nanopartículas, las cuales posteriormente se dispersan en el fluido mediante técnicas como agitación magnética, ultrasonido o la adición de surfactantes (Figura 2.3) [4].

Cada uno de estos métodos presenta ventajas y desventajas:

- **Método *One-step*:**

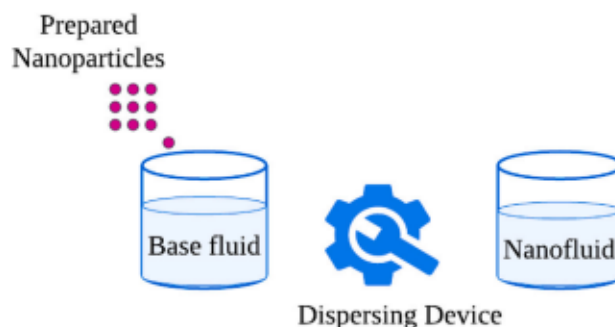
- **Ventajas:**

- a. Mayor estabilidad del nanofluido.
- b. Menor tendencia a la aglomeración y sedimentación.
- c. Obtención de nanopartículas de alta pureza.

- **Desventajas:**

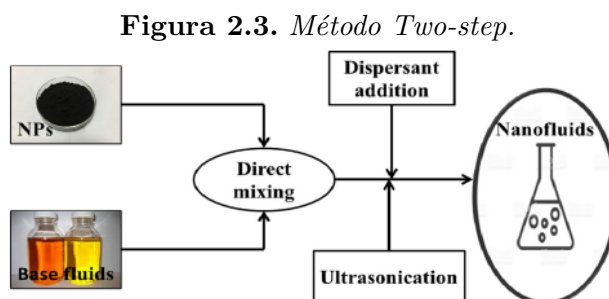
- a. Elevado costo de producción.
- b. Dificultad para escalar a nivel industrial.
- c. Limitado a ciertos tipos de nanopartículas.

Figura 2.2. Método *One-step*.



Fuente: *A comprehensive review on nanofluids: Synthesis, cutting-edge applications, and future prospects* [13].

- **Método *Two-step*:**
- **Ventajas:**
 - a. Menor costo de producción.
 - b. Factible para implementación industrial.
 - c. Permite la producción a gran escala.
- **Desventajas:**
 - a. Mayor riesgo de aglomeración de partículas.
 - b. Requiere el uso de agentes estabilizantes para mejorar la suspensión.



Fuente: *Transformer oil-based nanofluid: The application of nanomaterials on thermal, electrical and physicochemical properties of liquid insulation - A review* [4].

En términos generales, el método *two-step* es el más ampliamente utilizado debido a su menor costo y la posibilidad de producir nanofluidos en grandes volúmenes. No obstante, la aglomeración y sedimentación de nanopartículas sigue siendo uno de los principales desafíos en la síntesis de estos materiales [13].

Desde el punto de vista funcional, los nanofluidos presentan mejoras significativas en sus propiedades termofísicas respecto al fluido base. Estas mejoras pueden resultar beneficiosas o perjudiciales dependiendo de la aplicación [13]:

- **Conductividad térmica:**
 - a. Propiedad clave para aplicaciones de enfriamiento.
 - b. Influida por el tipo, tamaño y forma de las nanopartículas, su concentración, la temperatura y el grado de dispersión.
- **Viscosidad:**
 - a. Un aumento en la viscosidad incrementa las pérdidas por fricción.
 - b. La viscosidad puede controlarse mediante el ajuste del tamaño y concentración de las nanopartículas.
- **Densidad y calor específico:**

- a. La densidad de los nanofluidos tiende a ser mayor que la del fluido base.
- b. El calor específico puede disminuir levemente con la incorporación de nanopartículas.

En el contexto de este trabajo, se analiza el uso de nanofluidos en transformadores de potencia, dispositivos que requieren un sistema de enfriamiento altamente eficiente. La incorporación de nanofluidos ofrece los siguientes beneficios:

- Mejora de las propiedades dieléctricas y de enfriamiento del aceite utilizado en el transformador.
- Extensión de la vida útil del equipo mediante una mayor eficiencia en la disipación térmica.
- Posibilidad de reducir el tamaño y el costo del transformador, gracias a una mayor eficiencia térmica y aislación.

Las pruebas experimentales más comúnmente utilizadas para evaluar el desempeño de los nanofluidos en transformadores incluyen: mediciones de rigidez dieléctrica, descargas parciales, tangente delta, análisis de gases disueltos (DGA) y espectroscopía UV-Visible.

2.3. Pruebas en nanofluidos

2.3.1. Descargas parciales

Las descargas parciales (DPs) corresponden a fallas localizadas que ocurren en medios aislantes sólidos, líquidos o gaseosos, y están asociadas a esfuerzos mecánicos, térmicos, eléctricos y ambientales que deterioran progresivamente el material dieléctrico. Este fenómeno representa un claro indicador del envejecimiento y degradación del sistema de aislamiento, ya que con el tiempo conlleva a la pérdida gradual de sus propiedades aislantes, lo que puede derivar en una ruptura total del sistema.

A pesar de su efecto perjudicial, las descargas parciales presentan una característica de autoextinción, manifestándose como pulsos eléctricos de corta duración y naturaleza pulsante, que se detectan típicamente como impulsos de corriente.

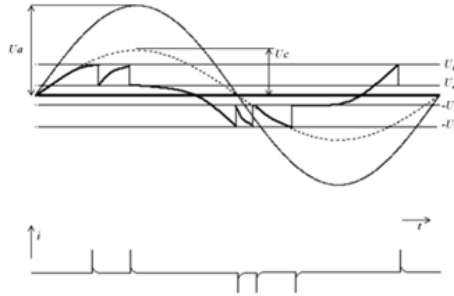
Para que se origine una descarga parcial, deben cumplirse de manera simultánea las siguientes condiciones:

- Existencia de un campo eléctrico lo suficientemente elevado como para inducir la ruptura dieléctrica en la zona con menor rigidez del aislamiento.
- Presencia de electrones libres que, al colisionar con moléculas neutras, generan procesos de ionización y la formación de pares electrón-ión positivo, iniciando así una avalancha electrónica.

Las descargas parciales se caracterizan por generar corrientes de muy corta duración, típicamente en el rango de 0,1 a 10 [ns]. No obstante, su detección oportuna, así como el seguimiento de su evolución en el tiempo, permite evaluar el estado del aislamiento y

tomar decisiones informadas respecto a la planificación de mantenimientos predictivos. Tal como se ilustra en la Figura 2.4, una descarga parcial se inicia con la aplicación de una tensión al sistema de aislamiento (U_a). Esta tensión disminuye localmente hasta alcanzar la zona con mayor concentración de campo eléctrico y menor rigidez dieléctrica (U_c). Si en esa región se alcanza la tensión de ignición (U_i^+), se produce la descarga, la cual hace descender la tensión hasta llegar a la tensión de extinción (U_e), momento en que la descarga se extingue.

Figura 2.4. Descarga parcial resultante bajo tensión alterna.



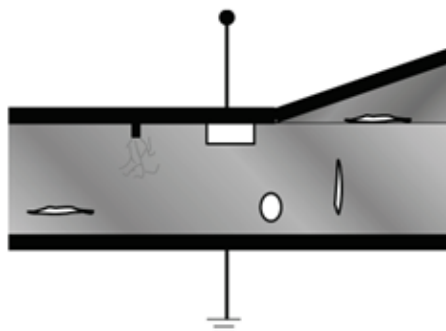
Fuente: Separación de fuentes de descargas parciales y ruido eléctrico mediante análisis de potencia espectral en alta frecuencia [14].

Las descargas parciales se clasifican en diferentes tipos según su mecanismo de origen y la zona en que se manifiestan. Las principales categorías son las siguientes [14]:

- **Internas:** se producen dentro del volumen del material aislante, comúnmente en cavidades, burbujas o inclusiones gaseosas.
- **Superficiales:** ocurren a lo largo de la superficie del aislante, frecuentemente en presencia de contaminación o humedad.
- **Corona:** se generan en zonas con alta divergencia de campo eléctrico, típicamente en bordes afilados o electrodos mal diseñados en presencia de aire.

2.3.1.a. Descargas parciales internas

Este tipo de descarga parcial tiene su origen en vacuolas que contienen gas de baja rigidez dieléctrica, inclusiones de partículas extrañas, protuberancias metálicas o grietas internas presentes en el material aislante, así como también en discontinuidades ubicadas en la interfaz entre el aislamiento y los electrodos (como se ilustra en la Figura 2.5).

Figura 2.5. Ejemplos de descargas parciales internas.

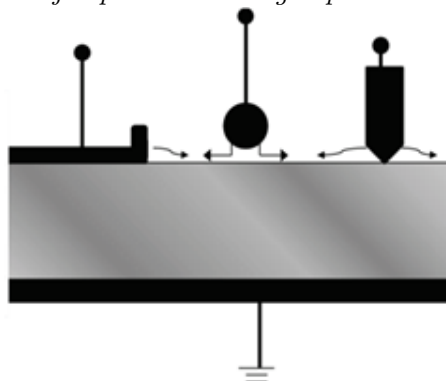
Fuente: Separación de fuentes de descargas parciales y ruido eléctrico mediante análisis de potencia espectral en alta frecuencia [14].

Una vez que se produce la descarga parcial, las cargas eléctricas tienden a redistribuirse dentro de la cavidad en función de la polaridad del campo aplicado. Esta redistribución da lugar a la formación de cúmulos de carga espacial en las paredes de la cavidad, generando así un campo eléctrico adicional en el interior del material aislante.

Las descargas parciales internas son consideradas especialmente críticas debido a que su acción se concentra en zonas muy localizadas y estructuralmente débiles del aislamiento. La repetida ocurrencia de este fenómeno produce una erosión progresiva del material circundante, lo que con el tiempo puede conducir a su degradación severa y eventual destrucción total [14].

2.3.1.b. Descargas parciales Superficiales

A diferencia de las descargas parciales internas, este tipo de descarga parcial se origina en las interfases entre dos materiales dieléctricos o entre un conductor y un aislante, siempre que exista algún tipo de contaminación sobre la superficie del material aislante. Su aparición está asociada a la presencia de componentes tangenciales del campo eléctrico, las cuales, al alcanzar una alta intensidad, se extienden más allá del electrodo de origen. Este campo eléctrico bordea la superficie del aislante hasta alcanzar zonas de menor potencial, tal como se muestra en la Figura 2.6.

Figura 2.6. Ejemplos de descargas parciales superficiales.

Fuente: Separación de fuentes de descargas parciales y ruido eléctrico mediante análisis de potencia espectral en alta frecuencia [14].

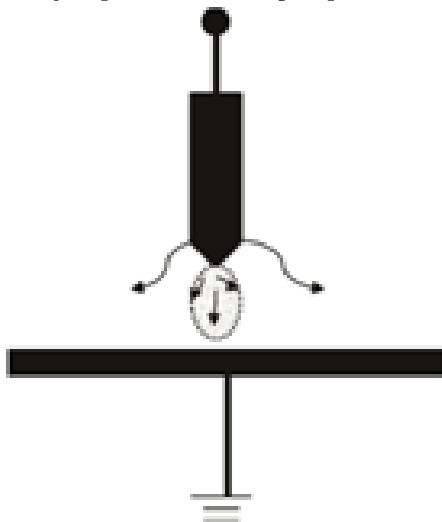
Estas descargas tienden a manifestarse en las fases del sistema donde se aplica una mayor tensión y presentan una alta variabilidad en su magnitud. Aunque son indeseadas y potencialmente dañinas, su detección y análisis permiten localizar la fuente del problema, lo que contribuye a implementar medidas de mitigación oportunas para evitar el deterioro progresivo del sistema de aislamiento [14].

2.3.1.c. Descargas parciales tipo corona

Este tipo de descarga parcial, conocida como descarga tipo corona, se origina cuando un conductor o electrodo presenta una forma afilada o un pequeño radio de curvatura, y se encuentra sometido a un campo eléctrico de alta intensidad. Bajo estas condiciones, la concentración del campo eléctrico en la punta del electrodo es suficiente para ionizar el gas o líquido circundante, generando así una ruptura localizada del medio dieléctrico en la zona afectada.

En contraste, en las regiones más alejadas del electrodo afilado, la intensidad del campo eléctrico disminuye considerablemente, lo que impide la ionización sostenida del medio, provocando que esta se extinga. Este fenómeno se representa gráficamente en la Figura 2.7.

Figura 2.7. Ejemplos de descargas parciales tipo corona.



Fuente: Separación de fuentes de descargas parciales y ruido eléctrico mediante análisis de potencia espectral en alta frecuencia [14].

La ocurrencia de este tipo de descarga suele ir acompañada de la emisión de una luz visible y ruido acústico característico, lo que permite su detección mediante técnicas ópticas o acústicas especializadas [14].

2.3.2. Descargas tipo impulso

El ensayo de descargas de tipo impulso consiste en la aplicación de una señal de tensión transitoria no periódica, caracterizada por un aumento rápido hasta alcanzar su valor *peak*, seguido de una caída más lenta. Este tipo de señal tiene por objetivo simular una descarga atmosférica, permitiendo evaluar el comportamiento dieléctrico del sistema de aislamiento

frente a sobretensiones transitorias. En este contexto, constituye una herramienta esencial para determinar si la rigidez dieléctrica de equipos eléctricos, como los transformadores de potencia, es adecuada para resistir fenómenos eléctricos extremos, como los provocados por descargas de rayo [15].

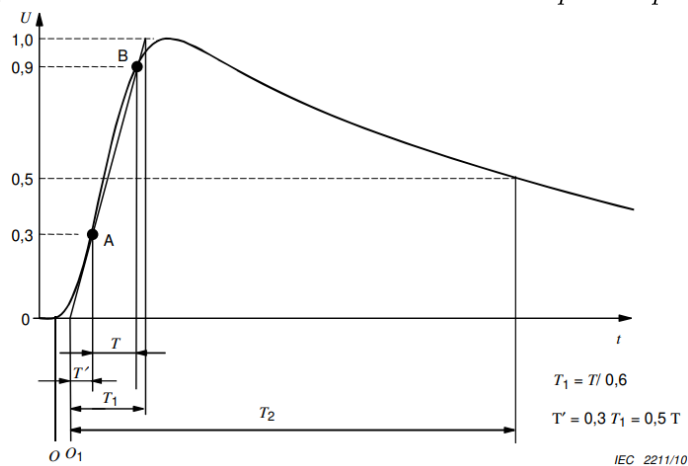
Para obtener resultados confiables en los ensayos de impulso aplicados a aceites minerales, utilizados como medio aislante y refrigerante en transformadores, es fundamental que el fluido se encuentre libre de defectos internos o impurezas. La presencia de contaminantes puede alterar significativamente los valores medidos, comprometiendo la validez del ensayo [16].

Distintas investigaciones han evidenciado que la incorporación de nanopartículas en aceites minerales constituye una alternativa prometedora para mejorar tanto la confiabilidad como la eficiencia operativa de transformadores de potencia. La presencia de nanopartículas no solo mantiene la rigidez dieléctrica del fluido base, sino que puede mejorar el comportamiento frente a impulsos eléctricos, especialmente en la zona del frente del pulso. Este efecto se atribuye a la mejora en las propiedades térmicas del fluido y, en ciertos casos, a una menor susceptibilidad frente a la humedad [8]. Sin embargo, para lograr una dispersión estable y homogénea de las nanopartículas en el medio líquido, es necesario incorporar surfactantes. Estos agentes permiten disminuir la aglomeración de partículas, favoreciendo una distribución más uniforme del calor y del campo eléctrico dentro del nanofluido. Esta homogeneidad se traduce en un desempeño eléctrico más robusto y confiable bajo condiciones de esfuerzo dieléctrico severo [15].

2.3.2.a. Ensayo impulso tipo rayo

El impulso tipo rayo corresponde a una señal de tensión transitoria no periódica, caracterizada por un tiempo de frente inferior a 20 $[\mu s]$. La forma de onda estándar de este tipo de impulso presenta un tiempo de frente de 1,2 $[\mu s]$, definido como el intervalo comprendido entre el 10 % y el 90 % del valor *peak* de la curva. En cuanto a la cola de la onda, esta posee un tiempo de 50 $[\mu s]$, el cual se determina como el intervalo entre el origen del impulso y el instante en que la tensión cae al 50 % de su valor máximo (véase la Figura 2.8) [15].

Figura 2.8. Forma de onda estándar de un impulso tipo rayo.



Fuente: IEC 60060-1:2010; high-voltage test techniques. part 1, general definitions and test requirements [15].

Los parámetros señalados en la Figura 2.8 se describen a continuación:

- **A:** 30 % del valor *peak* de la señal durante el frente.
- **B:** 90 % del valor *peak* de la señal durante el frente.
- **C:** 50 % del valor *peak* de la señal durante la cola.
- **O:** Origen o inicio del impulso.
- **O₁:** Origen virtual, correspondiente al punto donde la recta trazada entre A y B intersecta el eje temporal.
- **T:** Intervalo entre los instantes A y B (10 % a 90 %).
- **T₁:** Valor del tiempo de frente, calculado como $1,67 \times T$.
- **T₂:** Intervalo de tiempo entre el origen virtual O₁ y el punto C.

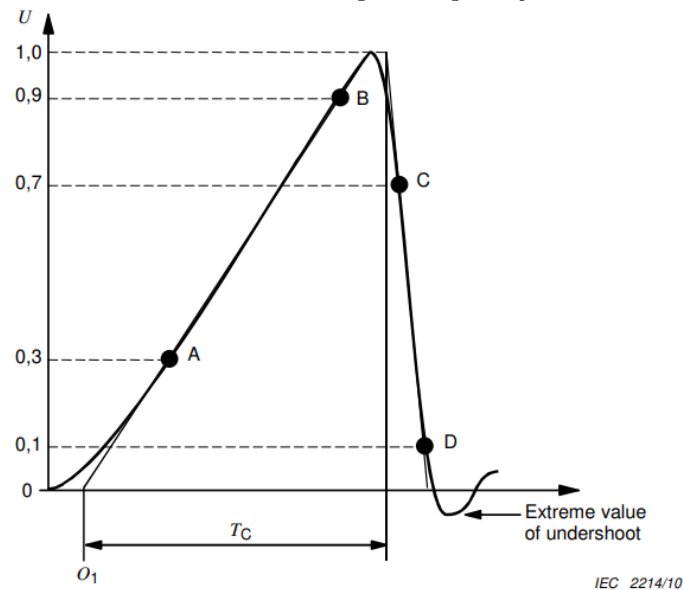
Según lo establecido en la norma IEC 60060-1, se permiten desviaciones de hasta $\pm 30\%$ y $\pm 20\%$ para los tiempos T_1 y T_2 , respectivamente. Asimismo, se acepta una variación de hasta $\pm 3\%$ en la amplitud del impulso [15].

Además de la forma de onda estándar, existen variantes de impulso tipo rayo, tales como:

- Impulso con corte en el frente.
- Impulso con corte en la cola.

2.3.2.b. Impulso tipo rayo con corte en el frente

Esta forma de impulso recibe su nombre debido a que el corte ocurre durante la etapa ascendente del frente de la señal, mediante la activación de un cortocircuito en el condensador de prueba. Esto provoca una interrupción abrupta en el frente del impulso, como se muestra en la Figura 2.9 [15].

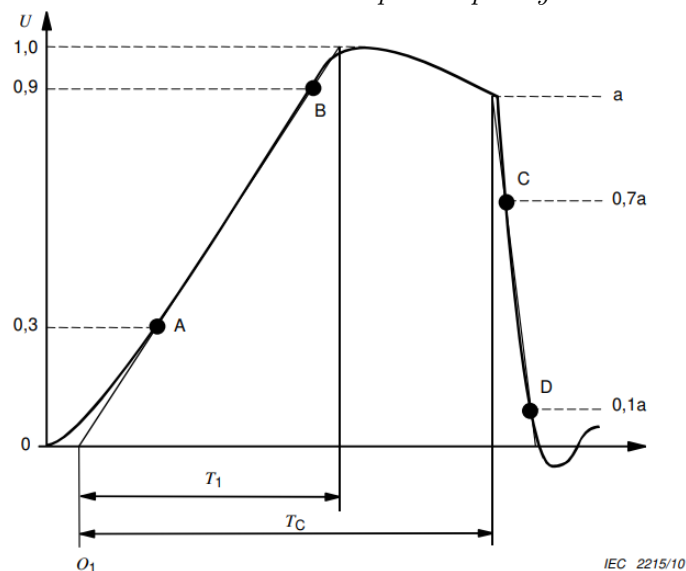
Figura 2.9. Forma de onda de un impulso tipo rayo con corte en el frente.

Fuente: IEC 60060-1:2010; high-voltage test techniques. part 1, general definitions and test requirements [15].

En este tipo de señal, se introduce un nuevo parámetro, el tiempo T_c , que corresponde al intervalo entre el origen virtual y el instante en que se alcanza el valor máximo antes de producirse el cortocircuito.

2.3.2.c. Impulso tipo rayo con corte en la cola

A diferencia del caso anterior, esta señal presenta un corte en la fase descendente de la curva, es decir, en la cola del impulso, lo que le otorga su denominación característica. La Figura 2.10 ilustra este tipo de señal [15].

Figura 2.10. Forma de onda de un impulso tipo rayo con corte en la cola.

Fuente: IEC 60060-1:2010; *high-voltage test techniques. part 1, general definitions and test requirements* [15].

En este caso, se definen los siguientes parámetros adicionales:

- **a:** Amplitud de la señal en el instante en que ocurre el corte.
- **C:** 70 % de la magnitud de la señal justo antes del corte.
- **D:** 10 % de la magnitud previa al corte.
- **T_c :** Intervalo entre el origen virtual y el momento en que ocurre el corte.

2.3.2.d. Circuito generador de tipo impulso

En los ensayos de impulso tipo rayo se utilizan principalmente dos topologías de circuitos generadores: el circuito con resistencia en serie y el circuito con resistencia en paralelo. La diferencia fundamental entre ambas configuraciones radica en la ubicación de la resistencia R_e con respecto al *gap* [17].

Cada uno de los elementos presentes en los circuitos ilustrados en las Figuras 2.11 y 2.12 cumple una función específica, que se detalla a continuación [17]:

- **C_s (Condensador principal):** Almacena la energía que será liberada como impulso. Se carga hasta la tensión inicial U_0 .
- **F (*Spark gap*):** Dispositivo de disparo que actúa como un interruptor no lineal. Cuando la tensión entre sus electrodos alcanza un umbral, el aire se ioniza, cerrando el circuito y permitiendo la descarga de C_s .
- **R_d (Resistencia de modelado del frente):** Controla la pendiente del frente de la onda de impulso. Un mayor valor de R_d produce un ascenso más lento de la señal, definiendo así el tiempo de frente.
- **R_e (Resistencia de modelado de la cola):** Junto con el condensador C_b , determina la duración de la fase descendente (cola) del impulso. La ubicación de esta resistencia —ya sea en serie o en paralelo con respecto al condensador C_b — influye directamente en el comportamiento temporal del impulso generado. En la configuración con resistencia en serie, el tiempo de frente está principalmente determinado por el valor de R_e . En cambio, en la configuración con resistencia en paralelo, la resistencia efectiva de cola resulta de la combinación de R_d y R_e , afectando tanto la disipación de energía como la pendiente de descenso del impulso.
- **C_b (Condensador de modelado):** Forma parte del circuito de salida y, en conjunto con R_e , determina el perfil de la cola del impulso.
- **$U(t)$:** Tensión de salida que se aplica al dispositivo bajo prueba.

Figura 2.11. Circuito generador con resistencia en serie.

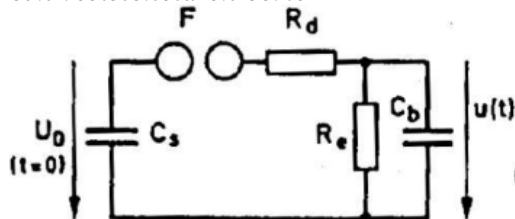
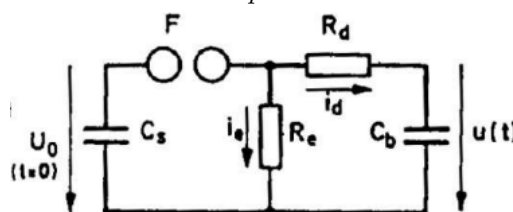


Figura 2.12. Circuito generador con resistencia en paralelo.



Fuente: *Introduction to High Voltage Experiments* [17].

2.3.3. Rigidez dieléctrica

Esta es una de las pruebas más comunes y críticas para evaluar la condición y el comportamiento de un aislante líquido, como el aceite mineral, frente a un incremento progresivo de la tensión eléctrica. La norma *IEC 60156* establece un procedimiento estandarizado para determinar la tensión de ruptura de un fluido aislante, mediante la aplicación de una tensión alterna que aumenta de forma controlada. Esta norma también define parámetros clave como la frecuencia de la tensión, la forma y separación de los electrodos, así como la velocidad de incremento de la tensión aplicada [18].

El objetivo principal del ensayo es determinar la capacidad del fluido para soportar tensiones eléctricas sin que ocurra una ruptura dieléctrica, lo cual permite identificar posibles niveles de contaminación o envejecimiento del aceite. La ruptura dieléctrica se produce cuando el campo eléctrico aplicado supera la capacidad aislante del aceite, provocando una descarga eléctrica entre los electrodos sumergidos en el fluido [19].

Para obtener resultados confiables, es esencial considerar diversos factores que pueden afectar el desarrollo de la prueba:

▪ **Factores que afectan negativamente el resultado del ensayo:**

- Presencia de humedad.
- Suciedad en los electrodos o en la celda.
- Inclusión de burbujas de aire.
- Presencia de residuos metálicos.

▪ **Condiciones necesarias para un procedimiento adecuado:**

- Limpieza rigurosa de la celda de prueba y los electrodos.
- Manipulación cuidadosa del aceite durante su preparación y vertido.

La norma *IEC 60156* permite distintas metodologías para realizar el ensayo. Una opción es agitar el fluido durante la prueba mediante un agitador magnético, especialmente en el caso de aceites empleados como refrigerantes. La tensión de ruptura puede alcanzar los 75 [kV] a una temperatura de 20 ± 5 [°C], utilizando electrodos esféricos o semiesféricos separados por una distancia estándar de $2,5 \pm 0,05$ [mm] [18].

Se han aplicado estos ensayos a fluidos con distintas nanopartículas, tanto magnéticas (Fe_3O_4) como semiconductoras (TiO_2). Los resultados han demostrado que la incorporación de nanopartículas puede mejorar significativamente la rigidez dieléctrica del fluido, aunque esta mejora depende de la concentración utilizada. El mecanismo que explica este comportamiento se atribuye a la capacidad de las nanopartículas para actuar como trampas de electrones, reduciendo la formación de *streamers*, lo cual disminuye la probabilidad de ocurrencia de una ruptura dieléctrica [20].

Finalmente, para cuantificar la mejora relativa respecto al fluido base, se emplea la siguiente expresión:

$$\text{Mejora (\%)} = \left(\frac{\text{Tensión de ruptura del nanofluido}}{\text{Tensión de ruptura del fluido base}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (2.1)$$

2.3.4. Espectroscopía UV-Visible

La espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Visible) se basa en la absorción de energía luminosa o radiación electromagnética, lo que provoca la excitación de electrones desde el estado fundamental hacia un estado excitado. Esta técnica explora la región del espectro electromagnético comprendida entre 1,5 y 6,2 [eV], lo cual corresponde a longitudes de onda entre 200 y 800 [nm].

El objetivo principal de esta técnica es analizar la estructura electrónica de las moléculas, lo que permite, a su vez, determinar la concentración de los distintos compuestos presentes en una solución. En la Figura 2.13 se presenta el espectro electromagnético completo, donde se pueden identificar las diferentes regiones, incluida la zona del espectro visible. Esta última es perceptible por el ojo humano, tal como se muestra en la Figura 2.14 [21].

Figura 2.13. Espectro electromagnético.

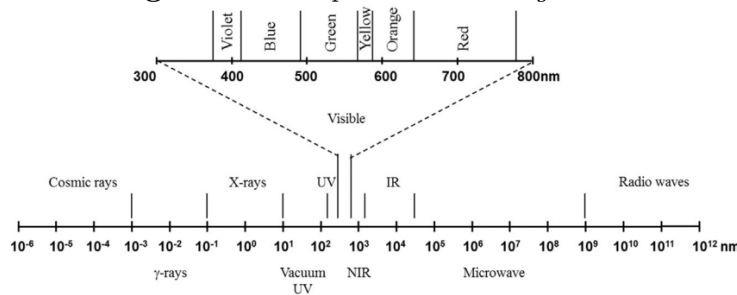
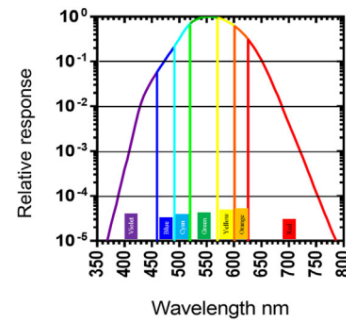


Figura 2.14. Zona del espectro visible perceptible por el ojo humano.



Fuente: UV-VISIBLE Spectrophotometry of Waters and Soils [21].

El fundamento de esta técnica está dado por la ley de Beer-Lambert, expresada en la ecuación 2.2 [22]:

$$A = \epsilon \cdot b \cdot c \quad (2.2)$$

Donde [22]:

- **A**: Absorbancia (adimensional).
- **ϵ** : Absorptividad molar del analito [$M^{-1} \cdot cm^{-1}$].
- **b**: Longitud de paso óptico de la celda [cm].
- **c**: Concentración de la solución [$mol \cdot L^{-1}$].

Esta ley asume condiciones ideales para su aplicación, entre las que se destacan [21]:

- Radiación estrictamente monocromática.
- Ausencia de pérdidas por dispersión o reflexión no compensadas.
- Incidencia perpendicular del haz sobre la celda.
- Ausencia de interacciones moleculares entre especies absorbentes.
- Temperatura constante durante la medición.

Para obtener resultados confiables, es fundamental calibrar el espectrofotómetro utilizando una muestra de referencia conocida como “blanco”, la cual permite corregir interferencias del solvente y del material de la celda [22].

Adicionalmente, es importante minimizar diversos efectos que pueden distorsionar el espectro obtenido, tales como [21]:

- Transmisión no deseada.
- Reflexión especular y difusa.
- Refracción en interfaces ópticas.
- Dispersión de la luz.
- Luminiscencia inducida por radiación.
- Fenómenos quiró-ópticos (como dicroísmo circular o rotación óptica).

2.3.5. Tangente delta

La prueba de tangente delta ($tg(\delta)$), también conocida como factor de disipación (FD), es un ensayo realizado bajo tensión alterna que permite evaluar el estado y la calidad del aislamiento en distintos componentes eléctricos, como líquidos aislantes, cables y transformadores. El factor de disipación se define como el cociente entre la corriente de pérdidas y la corriente capacitiva. Esta magnitud representa las pérdidas dieléctricas que sufre un líquido aislante cuando se somete a un campo eléctrico alterno, así como la energía disipada en forma de calor [16] [23].

El comportamiento dieléctrico de un aislante puede modelarse mediante el circuito equivalente mostrado en la Figura 2.15. Las corrientes que circulan en el sistema se representan en la Figura 2.16, donde se define el ángulo de disipación (δ), el cual indica la desviación

respecto a un comportamiento puramente capacitivo. El ángulo complementario a δ se conoce como ángulo de potencia [24].

Figura 2.15. Circuito equivalente que modela un sistema aislante.

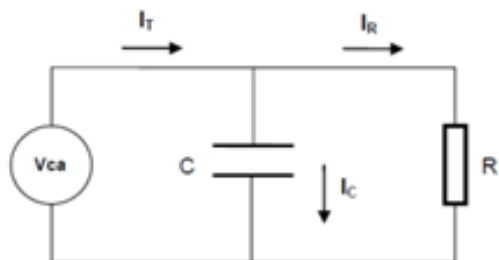
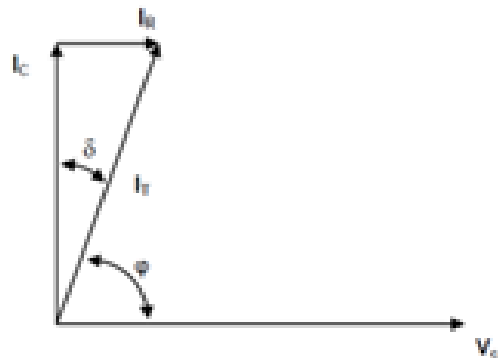


Figura 2.16. Diagrama fasorial del circuito equivalente.



Fuente: Métodos de evaluación del nivel de aislamiento [24].

Para garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos en este tipo de ensayo, es esencial considerar los siguientes aspectos:

- Realizar una limpieza rigurosa de los electrodos.
- Eliminar por completo las burbujas de aire presentes en la muestra.
- Prevenir cualquier tipo de contaminación cruzada entre muestras durante su manipulación.

El ensayo de tangente delta es ampliamente utilizado como herramienta de control de calidad y como indicador del deterioro del aceite aislante, ya sea por contaminación, envejecimiento en servicio o manejo inadecuado [23].

En el contexto del presente estudio, este ensayo adquiere especial relevancia, ya que permite determinar si la incorporación de nanopartículas genera un aumento en las pérdidas dieléctricas o altera las propiedades del fluido base. Además, contribuye a verificar la estabilidad eléctrica del nanofluido bajo condiciones térmicas controladas.

En cuanto a la interpretación de los resultados, valores bajos de $\tan(\delta)$ indican bajas pérdidas dieléctricas en corriente alterna, lo cual es deseable. Por el contrario, valores elevados pueden ser indicativos de deterioro del aislamiento o presencia de contaminantes, como humedad, productos de oxidación o residuos de degradación [23].

Capítulo 3

Montaje experimental y materiales

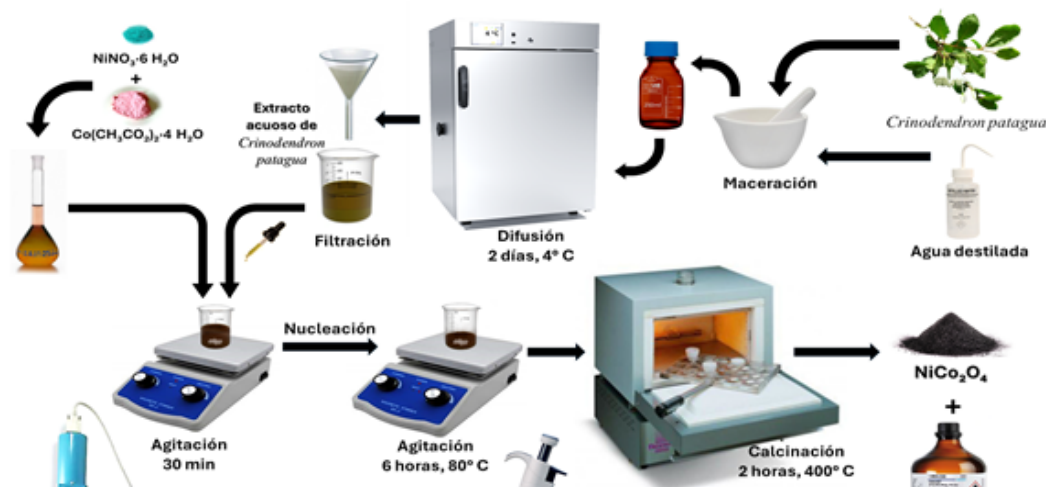
3.1. Síntesis de nanopartículas

En la Figura 3.1 se presenta el proceso de síntesis de la nanopartícula $NiCo_2O_4$, se inicio macerando *Crinodendron Patagua* con agua destilada, donde luego se paso a que se le realizará el proceso de difusión por un tiempo de 2 dias a una temperatura de 4 [°C], a continuación se llevó a cabo el uso de sales de acetato de cobalto tetrahidratado ($Co(CH_3CO_2)_2 \cdot 4H_2O$) y nitrato de níquel hexahidratado ($Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$), en una proporción molar de 2:1, respectivamente.

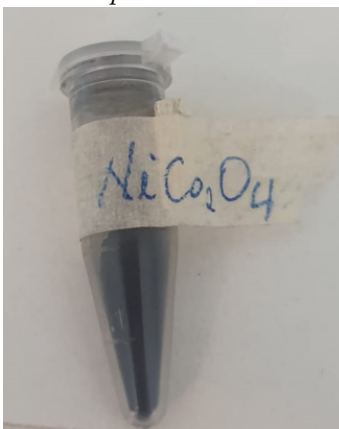
Posteriormente, se incorporaron 15 [ml] de un extracto acuoso de *Crinodendron Patagua*, mediante un proceso de adición gota a gota, hasta que la solución adquirió una coloración marrón, indicativa del progreso de la reacción.

La mezcla resultante fue sometida a agitación constante durante un período de 6 horas a una temperatura controlada de 80 [°C], lo que permitió la formación de un gel. Este gel fue calcinado durante 2 horas a 400 [°C], obteniéndose finalmente un polvo de color negro, correspondiente al material sintetizado, tal como se muestra en la Figura 3.2.

Figura 3.1. Proceso de sinterización de la nanopartícula de $NiCo_2O_4$.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2. *Nanopartícula resultante $NiCo_2O_4$* 

Fuente: *Elaboración propia.*

3.2. Síntesis del nanofluido

Para la formación del nanofluido se requieren los siguientes elementos:

- Fluido base (aceite mineral).
- Surfactante (ácido oleico).
- Nanopartículas ($NiCo_2O_4$).

La síntesis del nanofluido se realizó mediante el método de dos pasos (*two-step*), el cual consiste en dos etapas principales: la primera corresponde a la síntesis de las nanopartículas y la segunda a la preparación del nanofluido.

En esta sección se detalla el procedimiento correspondiente a la segunda etapa, es decir, la preparación del nanofluido. El proceso se inicia recolectando 700 [ml] de aceite mineral (fluido base), al cual se le adiciona ácido oleico (surfactante) en una proporción del 10 % respecto al volumen del fluido base, es decir, 70 [ml]. Esta mezcla se somete a agitación mediante un agitador magnético durante 30 minutos, con el objetivo de obtener una solución homogénea [20].

Posteriormente, se incorporan las nanopartículas $NiCo_2O_4$ en la concentración deseada. Para asegurar una correcta dispersión de las nanopartículas en el medio, se utiliza el equipo VELP modelo OV625, el cual permite realizar una homogenización eficiente del nanofluido. Este proceso se mantiene durante un tiempo de 45 minutos [20].

Finalmente, una vez completada la homogenización, el recipiente que contiene el nanofluido es sellado de forma hermética y se deja reposar en condiciones estáticas, evitando cualquier perturbación externa que pueda afectar la estabilidad de la dispersión.

El procedimiento que se siguió se puede apreciar en la Figura 3.3:

Figura 3.3. Proceso de sintetización de nanofluido aceite/ NiCo_2O_4 

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Rigidez Dieléctrica

Para la realización del ensayo de rigidez dieléctrica se empleará el equipo *BAUR Oil Tester DPA*, el cual se muestra en la Figura 3.4. La celda de prueba, que contiene los electrodos y donde se coloca la muestra a ensayar, se presenta en la Figura 3.5. Una de las principales ventajas de este equipo es su capacidad de operar conforme a diversas normativas internacionales, como las definidas por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) y la *American Society for Testing and Materials* (ASTM). En este estudio se aplicará la norma *IEC 60156*.

De acuerdo con lo establecido en dicha norma, el procedimiento comienza con una limpieza rigurosa de la celda y de los electrodos. Posteriormente, se realiza una calibración utilizando un aceite limpio al que se le aplican 24 rupturas dieléctricas. Para cada muestra a evaluar, se ejecutan 6 rupturas separadas por intervalos de 2 minutos. Los resultados se presentan en un informe que incluye los valores individuales de tensión de ruptura, su promedio y la desviación estándar correspondiente.

Una vez finalizada la prueba de una muestra, es necesario enjuagar cuidadosamente la celda para evitar la contaminación cruzada con residuos de aceites previamente utilizados.

Figura 3.4. Equipo BAUR DPA 75 C para ensayo en aceites aislantes.



Figura 3.5. Celda sin agitador para muestras del BAUR DPA 75 C.



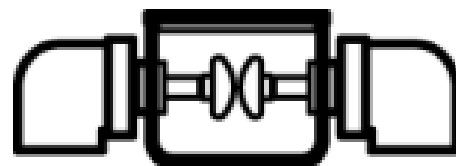
Fuente: Ensayo de aceites aislantes: ensayador de aceites aislantes portátiles [25].

Según lo dispuesto en la norma IEC 60156, se permiten dos configuraciones geométricas para los electrodos: esféricos y parcialmente esféricos, las cuales se ilustran en las Figuras 3.6 y 3.7. La forma del electrodo influye directamente en el punto de inicio de la ruptura dieléctrica, por lo que es fundamental respetar las dimensiones geométricas indicadas. Estos parámetros se detallan en la Tabla 3.1.

Figura 3.6. Celda con electrodos esféricos.



Figura 3.7. Celda con electrodos parcialmente esféricos.



Fuente: Ensayo de aceites aislantes: ensayador de aceites aislantes portátiles [25].

Tabla 3.1. Parámetros geométricos y eléctricos para electrodos en ensayos de rigidez dieléctrica.

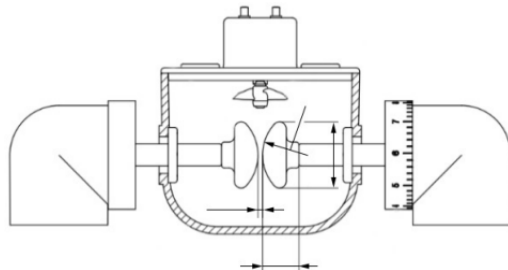
Tipo de Electrodo	Dimensiones [mm]	Distancia entre Electrodos [mm]	Aumento de la Tensión del Ensayo [kV/s]
Esférico	Diámetro: 12,5 a 13,0	$2,5 \pm 0,05$	$2,0 \pm 0,2$
Parcialmente Esférico	Radio: $25 \pm 0,25$		
	Diámetro: 36		

Fuente: Insulating liquids – determination of the breakdown voltage at power frequency – test method. [18].

La norma IEC 60156 también contempla, de forma opcional, el uso de agitación durante la prueba mediante un agitador magnético. Aunque en aceites en estado estático no es

estrictamente necesario, la agitación puede favorecer una distribución más homogénea del calor y de posibles impurezas. La celda equipada con agitador se muestra en la Figura 3.8.

Figura 3.8. Celda con agitador para muestras del BAUR DPA 75 C.



Fuente: *Insulating liquids – determination of the breakdown voltage at power frequency – test method.* [18].

3.4. Espectrofotometría UV-Visible

Para la realización de este ensayo se utilizará el equipo *Espectrofotómetro Orion Aqua-Mate 7100 Vis*, el cual se muestra en la Figura 3.9. Este instrumento opera en el rango visible del espectro electromagnético, abarcando longitudes de onda entre 325 y 1100 [nm]. Su objetivo principal es determinar la composición del fluido en estudio mediante la medición del parámetro de absorbancia.

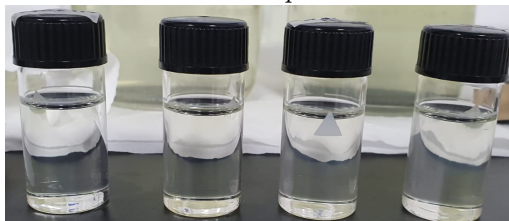
Figura 3.9. Espectrofotómetro utilizado en el ensayo de espectroscopía visible.



Fuente: *Elaboración propia.*

Las muestras que serán sometidas a análisis serán contenidas en viales de vidrio, como se muestra en la Figura 3.10. Es fundamental que estos viales se encuentren completamente limpios y sin daños visibles, ya que cualquier suciedad, rayadura o defecto podría interferir con el paso de la radiación luminosa, afectando así los valores de absorbancia y, por consecuencia, comprometiendo la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Figura 3.10. Viales de vidrio utilizados para contener las muestras a estudiar.

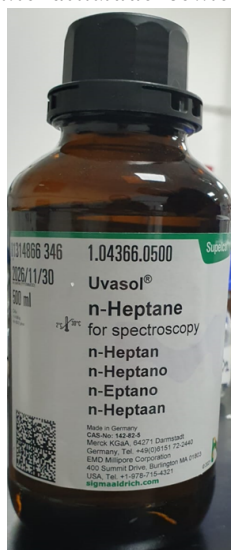


Fuente: *Elaboración propia.*

Antes de iniciar el ensayo, es necesario calibrar el equipo utilizando una referencia en blanco. En este caso, se ha empleado *heptano* como solvente de referencia, tal como se observa en la Figura 3.11. La elección del blanco es un aspecto crítico, ya que este también posee una absorbancia propia. Si el corte de absorbancia del blanco se encuentra cercano a la región donde se espera que la muestra absorba, se deberá utilizar un solvente alternativo que no interfiera con la medición.

Asimismo, el material de los viales debe considerarse cuidadosamente. En el caso del vidrio, este presenta un corte de absorbancia a partir de los 300 [nm]. Por lo tanto, si se prevé que las señales de absorbancia de las muestras se encuentren dentro de ese rango, se recomienda emplear viales fabricados con materiales más adecuados, como cuarzo o sílice fundida, que no limiten el paso de radiación en la región ultravioleta.

Figura 3.11. *Heptano utilizado como referencia en blanco.*



Fuente: Elaboración propia.

3.5. Montaje Impulso

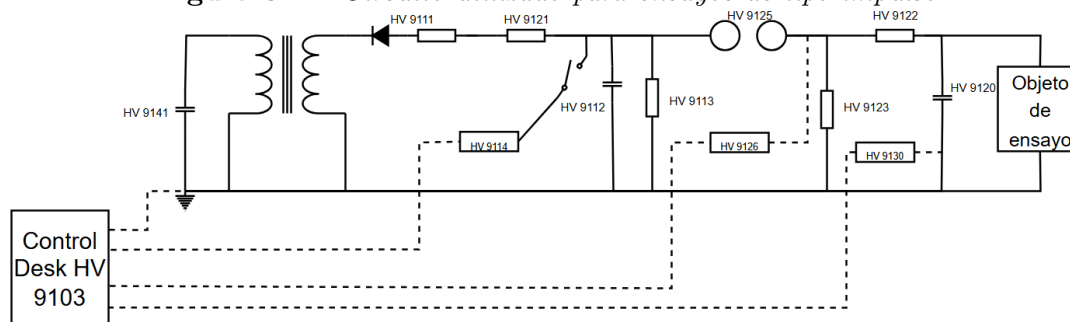
Los componentes empleados en el montaje del circuito generador de impulsos se enumeran a continuación [17]:

- Rectificador de silicio HV 9111 de 100 [k Ω].
- Resistencia de carga HV 9121 de 10 [M Ω].
- Resistencia de medición HV 9113 de 280 [M Ω].
- Condensador de impulso HV 9112 de 25 [nF].
- Varilla aislante HV 9124.
- Varilla de conexión HV 9108.
- Condensador de medida HV 9141 de 100 [pF].

- Mesa de control HV 9104.
- Seccionador de puesta a tierra HV 9114.
- Transformador de alta tensión HV 9105 de 220/110000 [V].
- Divisor de baja tensión HV 9130 de 507,33 [nF].
- Gap de esferas HV 9125.
- Voltímetro de pico de impulso HV 9152.
- Controlador de distancia de esferas HV 9126.
- Varilla de puesta a tierra HV 9107.
- Condensador de carga HV 9120 de 1,2 [nF].
- Pedestal de piso HV 9110.
- Resistencia de frente de onda HV 9122 de 350 [Ω].
- Conector tipo “cup” HV 9109.
- Resistencia de cola de onda HV 9123 de 2800 [Ω].

El circuito generador de impulsos empleado para el ensayo de tipo rayo se presenta en la Figura 3.12. Este se puede modelar de acuerdo al circuito teórico mostrado en la Figura 2.12, donde los elementos claves son los siguientes: la resistencia de frente R_d corresponde a HV 9122, el condensador de carga C_b a HV 9120, el condensador principal C_s a HV 9112 y la resistencia de cola R_e a HV 9123. Cabe señalar que los valores de estas resistencias influyen directamente en los tiempos de frente y cola de la onda de impulso generada.

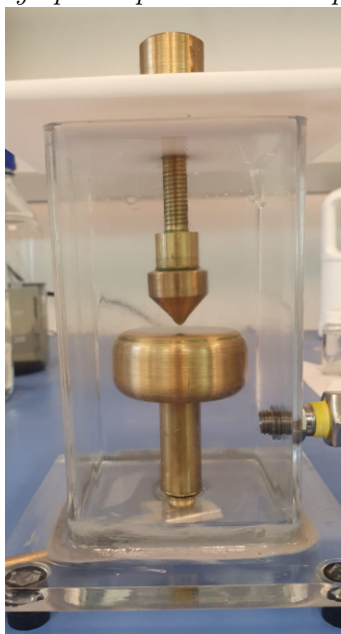
Figura 3.12. Circuito utilizado para ensayos de tipo impulso.



Fuente: Elaboración propia.

Las muestras se introducen en un recipiente construido con material dieléctrico, denominado “Objeto de Ensayo”, el cual incorpora dos electrodos: uno de forma cónica y otro plano, formando una configuración punta-plano con una separación de 1 [mm] entre ellos. Este dispositivo se muestra en la Figura 3.13.

Figura 3.13. *Objeto de ensayo punta-plano utilizado para ensayo impulso tipo rayo.*



Fuente: Elaboración propia.

Una vez completado el montaje, se procede a realizar el ensayo de impulso tipo rayo. El tensión aplicada será negativa al ser más exigente para el fluido dieléctrico, esta se incrementa de manera gradual, permitiendo observar el comportamiento de la muestra y verificar el correcto funcionamiento del sistema. Durante este proceso, se ajustan los parámetros del osciloscopio, como la escala de tiempo, la amplitud y el *trigger*, para una visualización precisa de la curva de impulso. Asimismo, se regula la distancia entre esferas para evitar someter innecesariamente a la muestra o los componentes a esfuerzos excesivos.

El incremento de voltaje continúa hasta que se detecta una curva de ruptura característica, como la que se ilustra en la Figura 2.10. A partir de ese punto, se generan impulsos controlados para determinar el valor pico de tensión que provoca la ruptura dieléctrica de la muestra.

3.6. Tangente Delta

Para la realización del presente ensayo se utilizará el equipo *TOR-3 LSL* de la marca *Globecore*, mostrado en la Figura 3.14. Este instrumento permite determinar parámetros fundamentales de la muestra, tales como el tangente del ángulo de pérdida dieléctrica ($\tan \delta$), la resistividad específica y la constante dieléctrica. El equipo es compatible con diversas normativas internacionales, entre las cuales se incluyen la *IEC-60247:2004-02*, *ASTM D924-08* y *ASTM D1169-02*, entre otras.

El propósito de medir estos parámetros es evaluar la calidad del fluido dieléctrico, identificando la presencia de contaminantes o el grado de envejecimiento que ha sufrido durante su vida útil.

Figura 3.14. *Equipo TOR-3 LSL utilizado para la medición del factor de disipación dieléctrico ($\tan \delta$).*



Fuente: TOR-3 (TOR-3 LSL) Tangente Delta del aceite [26].

El equipo *TOR-3 LSL* se compone de una celda de medición, una fuente de tensión sinusoidal (capaz de alcanzar hasta 2 [kV]) y un puente de medición, todo ello bajo condiciones térmicas controladas. Su principio de funcionamiento se basa en la aplicación de una señal de tensión alterna tanto a un condensador de referencia como a la celda de medición que contiene la muestra. Posteriormente, se analiza la magnitud y el desfase de las señales resultantes.

La diferencia en la amplitud de las señales entre el condensador de referencia y los electrodos de la celda es proporcional a la constante dieléctrica del fluido. En cambio, el desfase entre ambas señales permite calcular el valor del ángulo de pérdida dieléctrica ($\tan \delta$).

Para asegurar una medición precisa, la celda debe ser llenada con el fluido a ensayar y luego drenada dos veces para garantizar una limpieza adecuada del sistema. En el tercer llenado, se procede con la configuración del software del equipo, seleccionando la norma correspondiente, en este caso la *ASTM D924*. A continuación, el equipo inicia un proceso de calentamiento de la muestra hasta alcanzar los 100 [°C], momento en el cual se efectúa la medición.

Según lo estipulado por la norma, se deben realizar al menos dos mediciones. Si la diferencia relativa entre los resultados es inferior al 10 %, se considerará que el ensayo ha sido ejecutado correctamente y que los resultados obtenidos son confiables. En caso contrario, deberán realizarse dos nuevas mediciones hasta cumplir con el criterio de repetibilidad exigido.

Capítulo 4

Análisis y Resultados

4.1. Nanopartículas

A la nanopartícula $NiCo_2O_4$ se le aplicó microscopia electrónica de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés: *Transmission Electron Microscopy*). Esta técnica permite caracterizar materiales a escala nanométrica e incluso atómica, posibilitando la observación directa de la estructura interna del material analizado. A diferencia de un microscopio óptico convencional, TEM emplea electrones para formar la imagen, lo que proporciona una resolución significativamente mayor.

En las Figuras 4.1 y 4.2 se observan aglomerados formados por estructuras finamente dispersas. Si bien la escala utilizada (50 [nm]) no permite identificar con claridad el tamaño exacto de una nanopartícula individual, se aprecia una morfología general cuasi-esférica, aunque con ciertas irregularidades superficiales.

Por otra parte, en las Figuras 4.3 y 4.4, que corresponden a un mayor aumento, se logra observar con mayor nitidez partículas individuales. En particular, en la Figura 4.3, marcada con un círculo rojo, se distingue una partícula cuya dimensión se encuentra en el rango nanométrico, confirmando así la escala deseada en la síntesis.

Figura 4.1. Imagen TEM de la nanopartícula $NiCo_2O_4$ a una escala de 50 [nm].

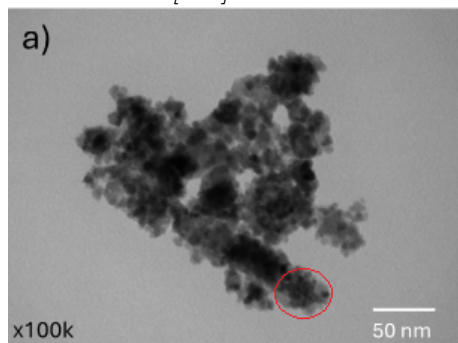


Figura 4.2. Imagen TEM de la nanopartícula $NiCo_2O_4$ a una escala de 50 [nm].

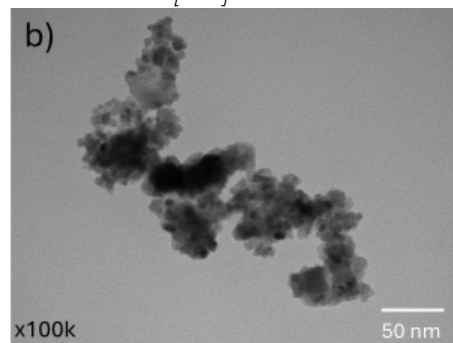


Figura 4.3. Imagen TEM de la nanopartícula NiCo_2O_4 a una escala de 20 [nm].

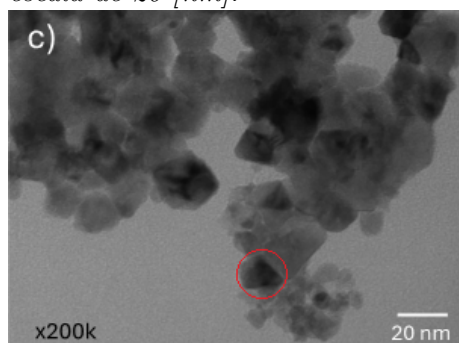
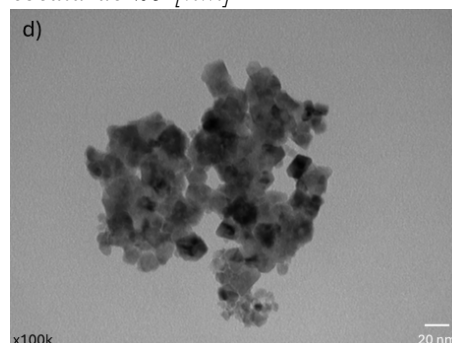


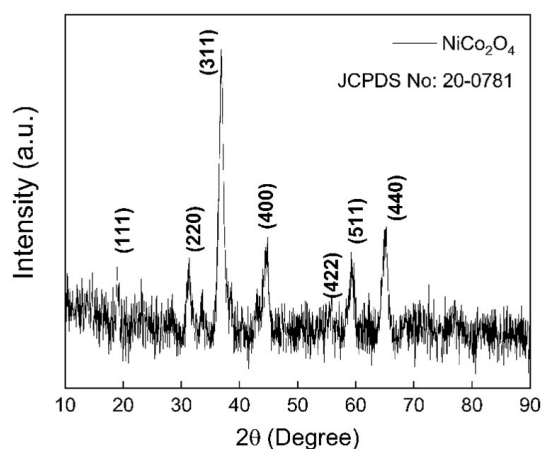
Figura 4.4. Imagen TEM de la nanopartícula NiCo_2O_4 a una escala de 20 [nm].



Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis por difracción de rayos X (XRD), técnica que permite identificar las fases cristalinas presentes y estimar la cristalinidad del material. En la Figura 4.5 se presenta el difractograma correspondiente a la nanopartícula NiCo_2O_4 , donde se identifican los picos característicos de los planos cristalográficos (111), (220), (311), (400), (422), (511) y (440). Estos resultados concuerdan con la ficha JCPDS N° 20-0781, lo cual confirma la forma típica de esta nanopartícula. El *peak* más intenso corresponde al plano (311), lo que es característico de la estructura del NiCo_2O_4 . Además, la ausencia de *peaks* adicionales sugiere que la muestra presenta una alta pureza estructural.

Figura 4.5. Difractograma de rayos X de la nanopartícula NiCo_2O_4 .



Fuente: Elaboración propia.

4.2. Rigidez Dieléctrica

En el momento de realizar este ensayo, se tenían las condiciones ambientales presentadas en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. *Condiciones ambientales para ensayo de Rigidez Dieléctrica.*

Temperatura [° C]	Humedad Relativa [%]
20	40

Fuente: *Elaboración propia.*

Esta prueba permite determinar hasta qué magnitud de tensión el aislante puede soportar sin que se produzca su ruptura. A continuación, se presenta la Tabla 4.2, en la cual se muestran los datos obtenidos al realizar el ensayo para cada una de las muestras utilizadas, junto con su respectiva variación porcentual respecto al fluido base, en este caso, aceite mineral para transformadores de potencia. Cabe destacar que se evaluaron cuatro muestras: aceite mineral, aceite con ácido oleico, nanofluido con una concentración de 10 [mg/L] y otro nanofluido con concentración de 40 [mg/L].

Tabla 4.2. *Rigidez dieléctrica para muestras utilizadas.*

Muestra	Tensión Promedio [kV]	Variación Procentual [%]
Aceite Mineral	37,5	-
Aceite Mineral con Ácido Oleico	49,7	32,5
Nanofluido 10 [mg/L]	61,0	62,7
Nanofluido 40 [mg/L]	70,5	88,0

Fuente: *Elaboración propia.*

Como se observa en la Tabla 4.2, la adición de aditivos y nanopartículas al fluido base (aceite mineral) mejora notablemente su capacidad para soportar el estrés eléctrico. El aceite mineral sin aditivos fue la muestra con la menor tensión de ruptura promedio. Al incorporar ácido oleico (actuando como surfactante), se obtuvo un incremento del 32,5 % en dicha tensión.

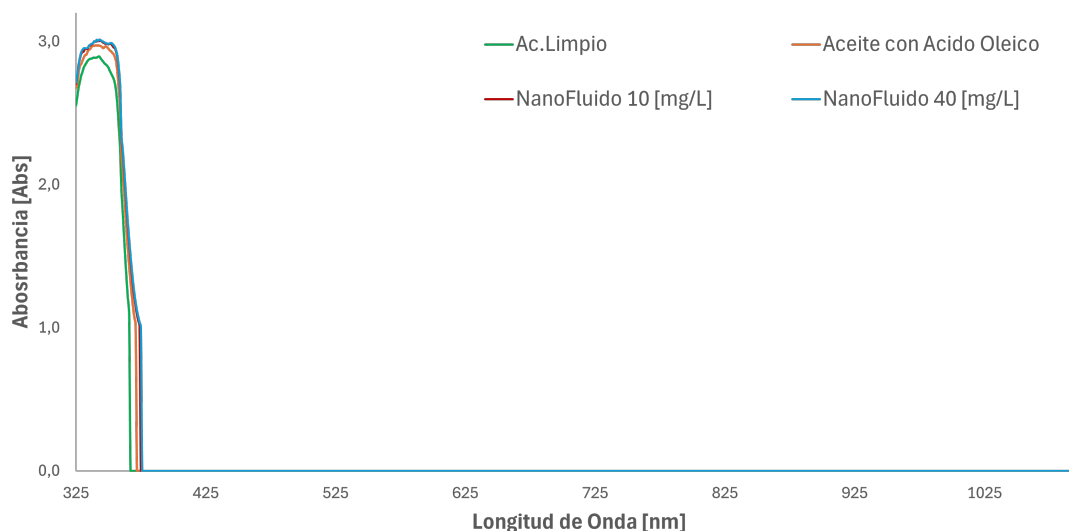
En el caso del nanofluido con una concentración de 10 [mg/L], la tensión de ruptura promedio se incrementó en un 62,7 % en comparación con el aceite mineral. Por su parte, el nanofluido con una concentración de 40 [mg/L] evidenció una mejora aún más significativa, alcanzando un aumento del 88,0 %.

Estas variaciones relativas tan marcadas en los nanofluidos respecto al fluido base pueden atribuirse a la presencia de la nanopartícula de $NiCo_2O_4$, cuyas propiedades magnéticas contribuyen a una distribución más homogénea del campo eléctrico aplicado, disminuyendo así la probabilidad de ruptura dieléctrica prematura.

4.3. UV-Visible

En este ensayo, las variaciones observadas entre las curvas correspondientes a las distintas muestras se atribuyen a diferencias en la absorbancia, es decir, a la capacidad del material para absorber energía a una determinada longitud de onda. Esta propiedad determina cuánta energía se retiene en un rango específico del espectro electromagnético. En la Figura 4.6 se presentan las curvas de absorbancia para cada muestra analizada.

Figura 4.6. Gráfico de absorbancia vs. longitud de onda en ensayo UV-Visible obtenido tras el ensayo.

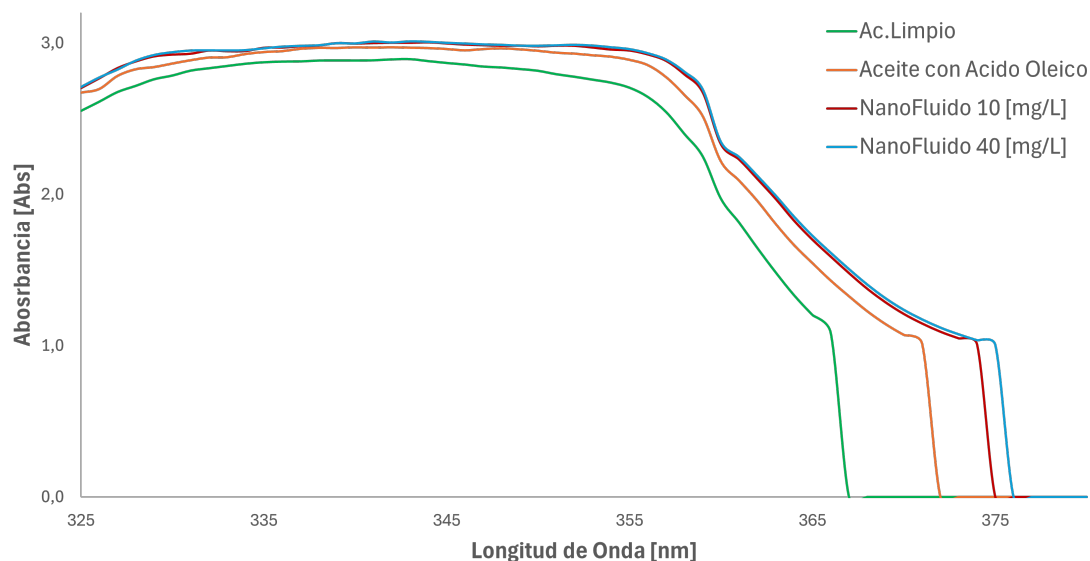


Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 4.6, en gran parte del espectro aplicado, las curvas presentan un comportamiento similar. No obstante, se identifican diferencias notorias en ciertos rangos, especialmente entre los 325 y 375 [nm], donde se registran aumentos en la absorbancia de algunas muestras en comparación con otras.

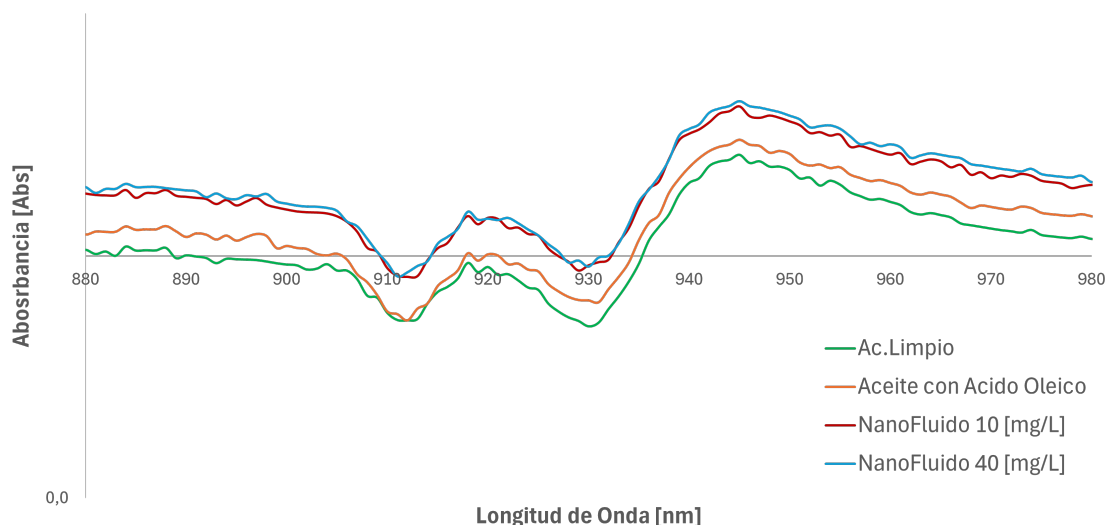
Al realizar un acercamiento entre las longitudes de onda de 325 a 380 [nm], como se muestra en la Figura 4.7, se aprecia que las muestras de nanofluido presentan una absorbancia superior respecto al aceite mineral limpio y al aceite con ácido oleico. Entre las muestras de nanofluidos, la de mayor concentración (40 [mg/L]) muestra una absorbancia ligeramente superior, aunque esta diferencia no es considerable, lo cual sugiere que el incremento en la concentración de nanopartículas no genera un impacto significativamente marcado en este rango espectral.

Además, se observa que los *peaks* de absorbancia para todas las curvas se ubican entre los 341 y 344 [nm], tras lo cual, a partir de los 365 [nm], las curvas comienzan un proceso de estabilización.

Figura 4.7. Gráfico de absorbancia vs. longitud de onda en el rango de 325 a 380 [nm].

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, la Figura 4.8 muestra un acercamiento en el rango de longitudes de onda entre 880 y 980 [nm]. En este intervalo, se evidencia que la muestra de aceite con ácido oleico presenta una absorbancia similar o incluso superior a la del aceite mineral limpio. Asimismo, se confirma que la variación en la concentración de nanopartículas no genera una diferencia significativa en esta zona, dado que las curvas correspondientes a los nanofluidos con concentraciones de 10 [mg/L] y 40 [mg/L] mantienen un comportamiento similar, con apenas ligeras variaciones.

Figura 4.8. Gráfico de absorbancia vs. longitud de onda en el rango de 880 a 980 [nm].

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se observa en las Figuras 4.6, 4.7 y 4.8, la incorporación de nanopartículas en el aceite mineral genera un aumento en la absorbancia del fluido aislante. Esto implica una mayor capacidad del medio para impedir el paso de ondas dentro del espectro

electromagnético visible. Sin embargo, a pesar del uso de aditivos como surfactantes y nanopartículas, las curvas de absorbancia mantienen un comportamiento característico de soluciones donde las partículas permanecen uniformemente dispersas y suspendidas en el fluido, sin provocar grandes variaciones en la forma general de la curva.

4.4. Descargas parciales impulso tipo rayo

Las condiciones climáticas al momento de realizar el ensayo de impulso tipo rayo se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. *Condiciones ambientales durante el ensayo de impulso tipo rayo.*

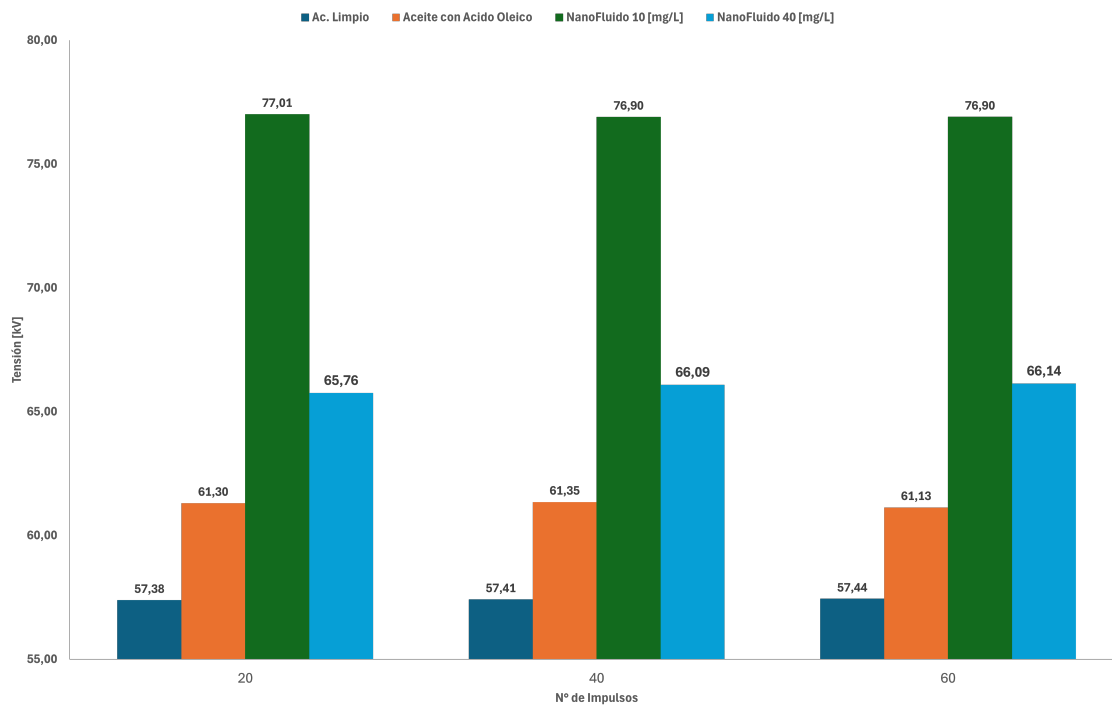
Temperatura [°C]	Humedad Relativa [%]
20	25

Fuente: *Elaboración propia.*

Durante este ensayo se aplicaron 60 impulsos negativos a cada muestra hasta alcanzar la tensión de ruptura. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4.9. Como puede observarse, la adición de nanopartículas incrementa notablemente la tensión de ruptura en comparación con el fluido base (aceite mineral). Destaca especialmente el nanofluido con una concentración de 10 [mg/L], el cual alcanzó una tensión de ruptura cercana a los -77 [kV]. En cambio, la muestra con una concentración de 40 [mg/L] presentó ruptura a una tensión aproximada de -66 [kV].

Esta diferencia puede atribuirse a la formación de caminos conductivos debido a la mayor concentración de nanopartículas. Por otro lado, al comparar ambos nanofluidos con el aceite base, se observa una mejora clara en la capacidad de soportar esfuerzos eléctricos, atribuible a las propiedades magnéticas del $NiCo_2O_4$, que favorecen una distribución más homogénea del campo eléctrico, permitiendo al fluido soportar tensiones más elevadas.

Figura 4.9. Tensiones de ruptura promedio para 20, 40 y 60 impulsos tipo rayo. Las tensiones reales son de polaridad negativa; sin embargo, se presentan en valor absoluto para facilitar la visualización comparativa entre las distintas muestras.

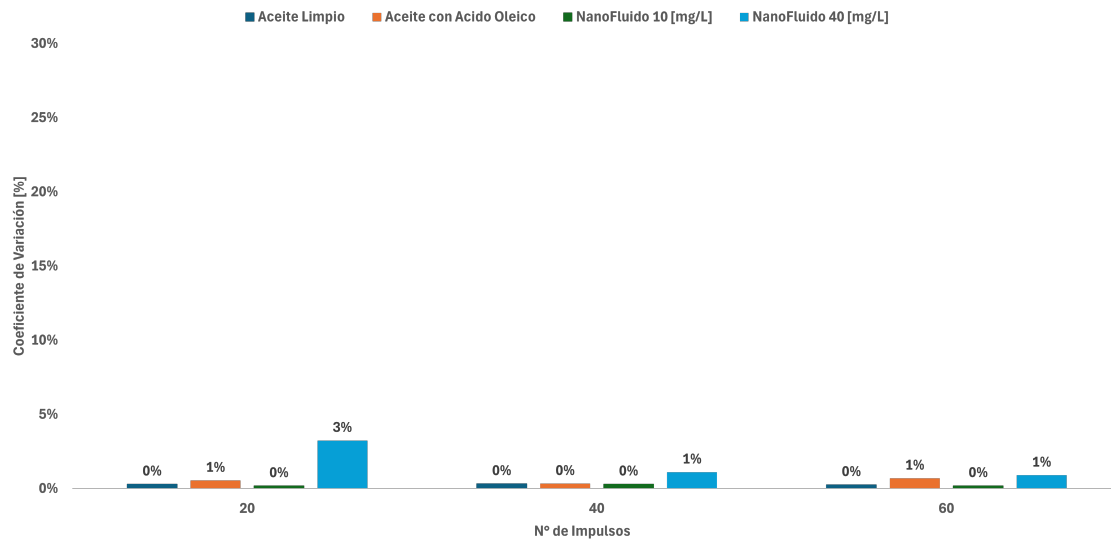


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.10 muestra el coeficiente de variación porcentual correspondiente a las tensiones obtenidas.

Como se puede ver, el valor más alto corresponde al nanofluido con concentración de 40 [mg/L], alcanzando un 3 % en los primeros 20 impulsos. No obstante, todos los valores se mantienen por debajo del 5 %, lo que indica una dispersión relativamente baja y por ende una buena repetibilidad en las mediciones.

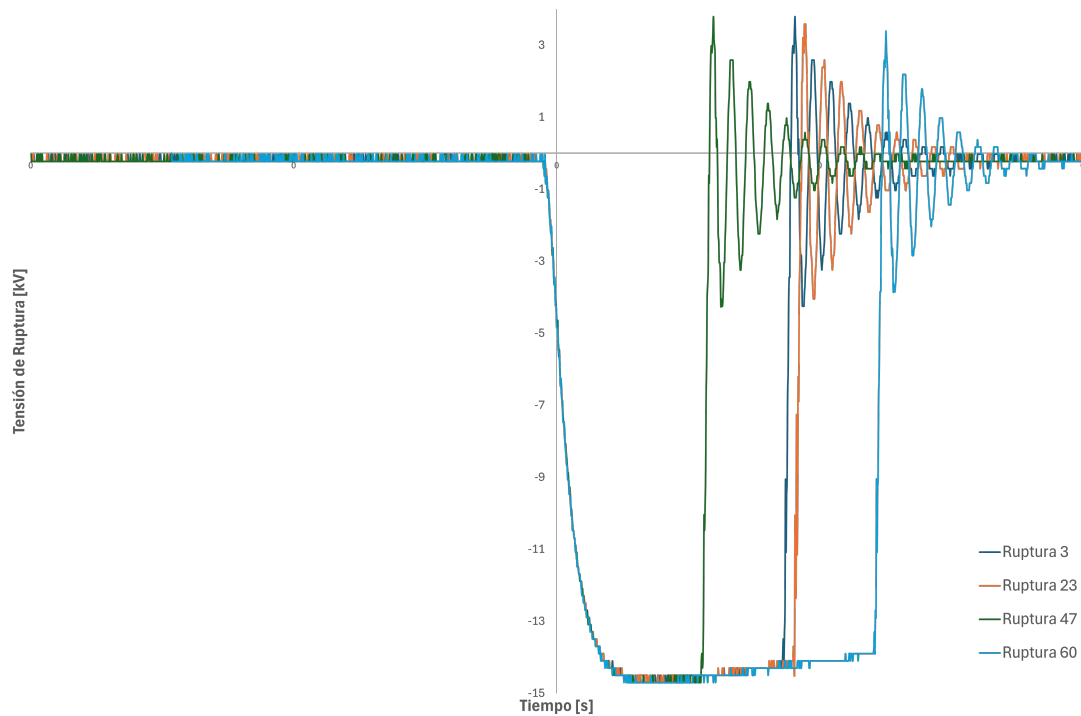
Figura 4.10. *Coeficiente de variación porcentual de las tensiones de ruptura promedio para 20, 40 y 60 impulsos tipo rayo.*



Fuente: *Elaboración propia.*

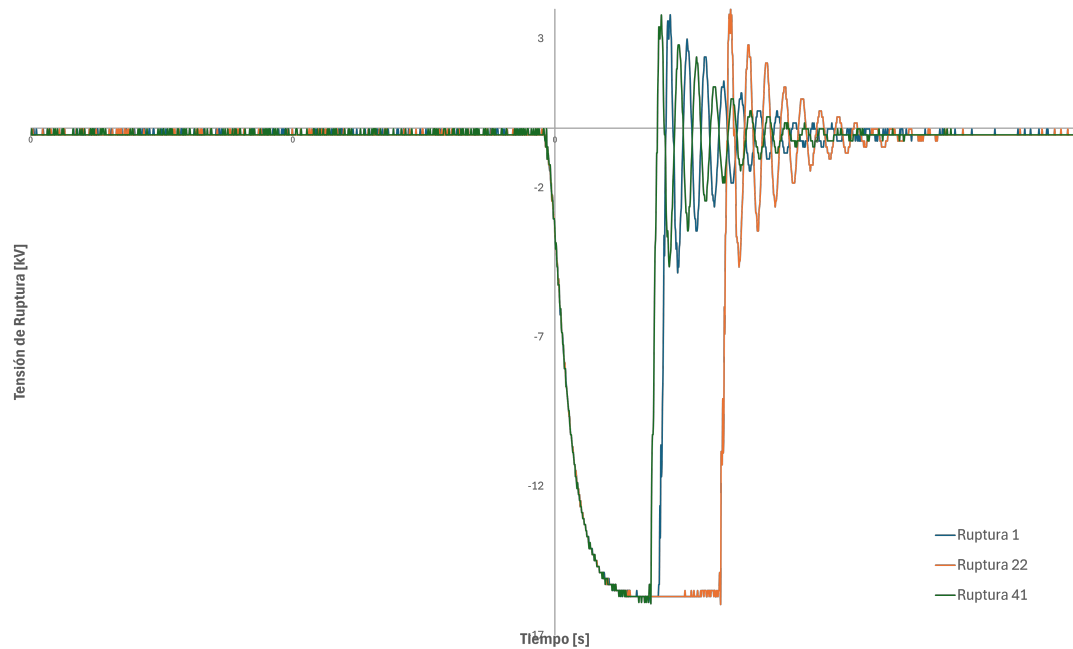
Las curvas representativas de tensión de ruptura para las muestras de aceite limpio y de aceite con ácido oleico se presentan en las Figuras [4.11](#) y [4.12](#), respectivamente.

Figura 4.11. *Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra de aceite limpio.*



Fuente: *Elaboración propia.*

Figura 4.12. Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra con ácido oleico.

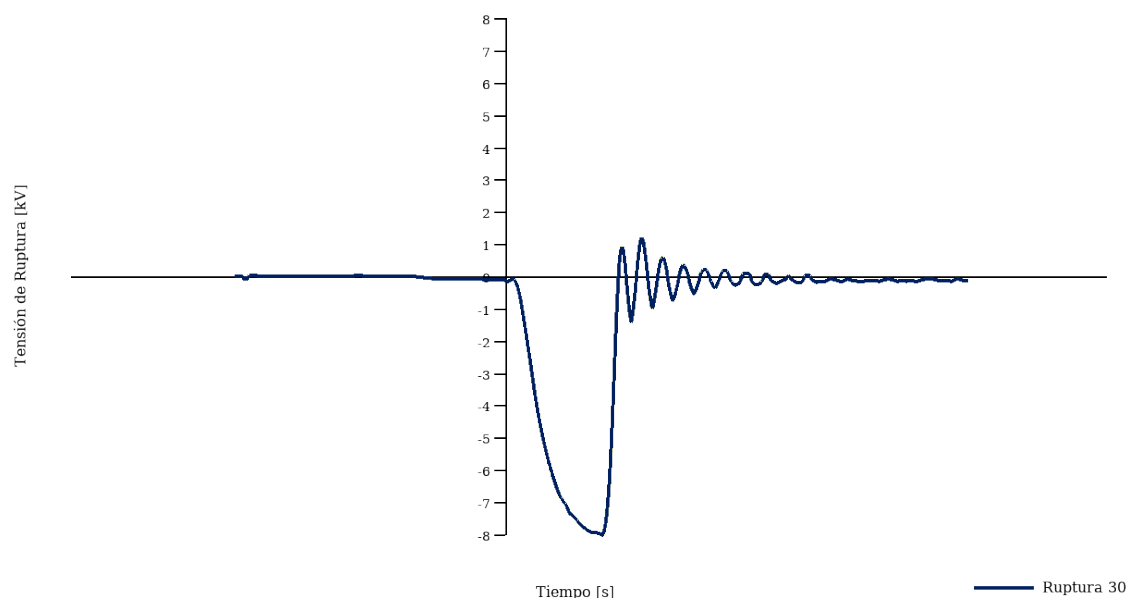


Fuente: Elaboración propia.

Ambas curvas muestran un comportamiento característico de una señal de impulso tipo rayo con cola cortada, lo que indica que el fluido alcanzó la tensión máxima antes de disminuir progresivamente hasta la ruptura.

En contraste, la Figura 4.13 presenta la curva de tensión de ruptura del nanofluido con concentración de 40 [mg/L], donde se observa una forma característica de impulso de frente cortado. Esto sugiere que la ruptura ocurrió antes de alcanzar el pico de tensión, lo que implica una menor capacidad del fluido para soportar el esfuerzo aplicado.

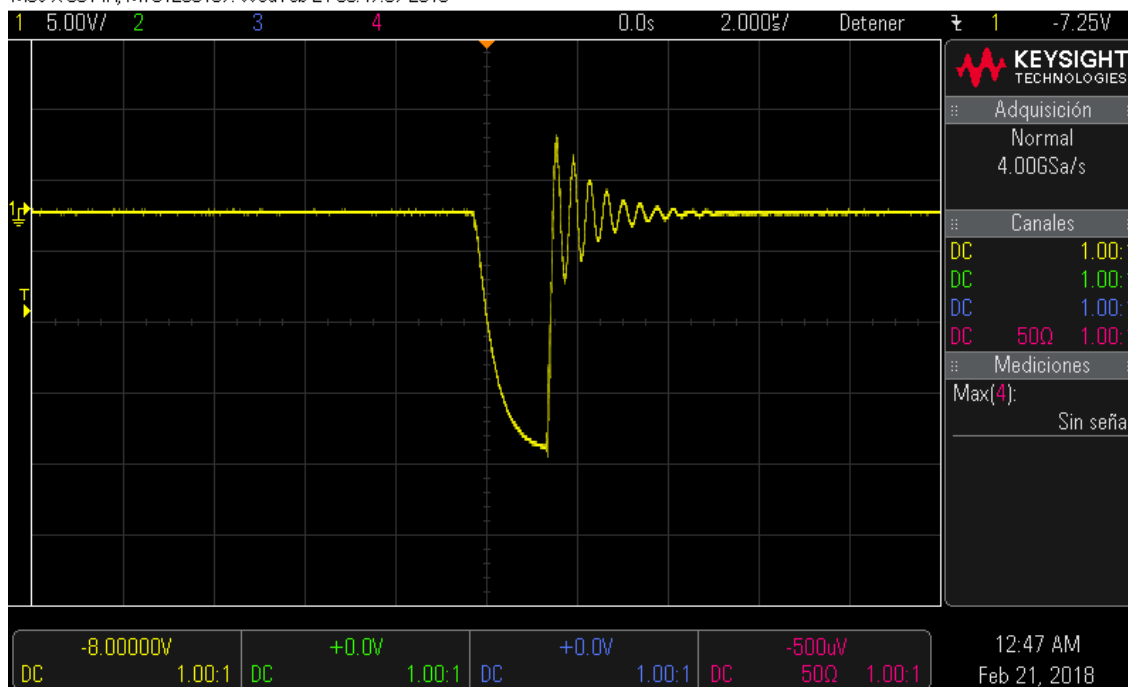
Figura 4.13. Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra de nanofluido con concentración de 40 [mg/L], imagen realizada a través de Inteligencia Artificial.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.14. Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra de nanofluido con concentración de 40 [mg/L].

MSO-X 3014A, MY51250157: Wed Feb 21 00:47:37 2018

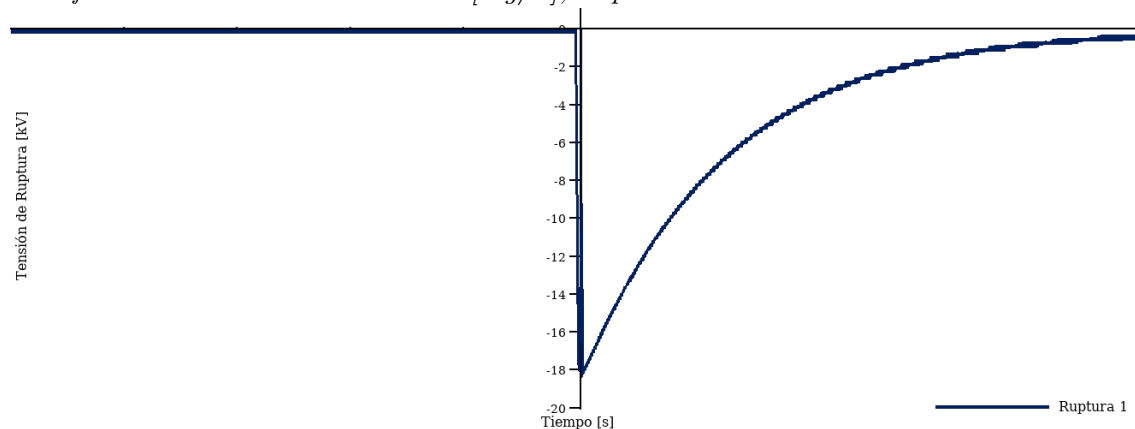


Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la Figura 4.15 muestra la señal correspondiente al primer impulso aplicado sobre el nanofluido de 10 [mg/L]. A pesar de las altas tensiones alcanzadas, no se observó

ruptura. Este comportamiento se mantuvo hasta el impulso número 56, como se aprecia en la Figura 4.17, donde nuevamente el fluido resistió sin fallas, demostrando una mejora significativa en su resistencia dieléctrica bajo solicitaciones de impulso.

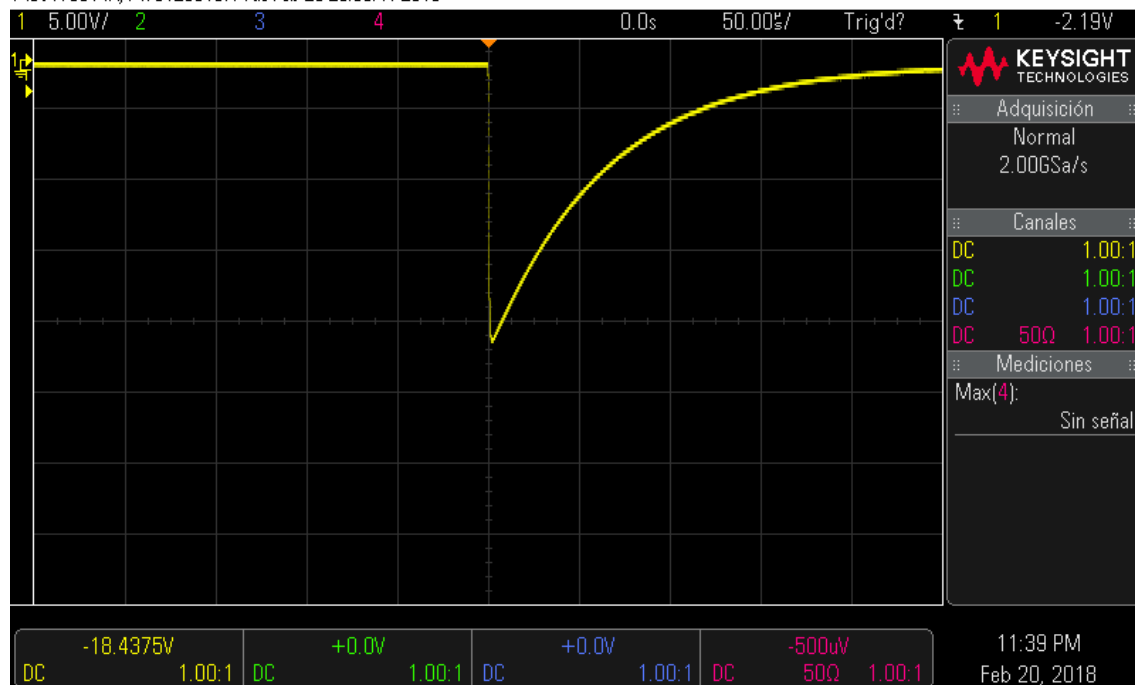
Figura 4.15. Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra de nanofluido con concentración de 10 [mg/L], impulso N° 1.



Fuente: Elaboración propia.

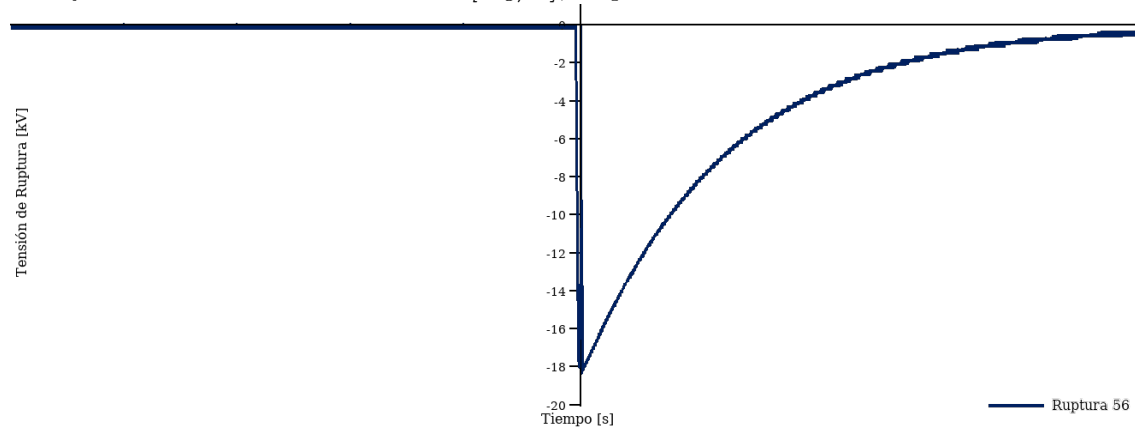
Figura 4.16. Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra de nanofluido con concentración de 10 [mg/L], impulso N° 1, imagen realizada a través de Inteligencia Artificial.

MSO-X 3014A, MY51250157: Tue Feb 20 23:39:41 2018



Fuente: Elaboración propia.

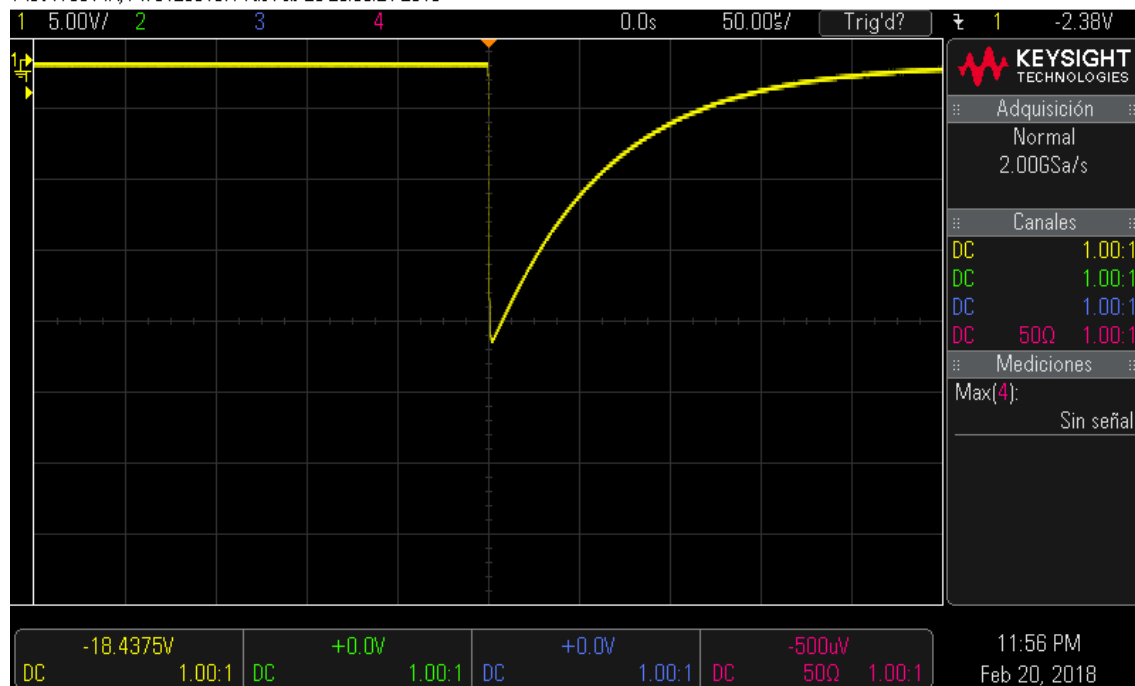
Figura 4.17. Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra de nanofluido con concentración de 10 [mg/L], impulso N° 56.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.18. Curva de tensión de ruptura por impulso negativo para muestra de nanofluido con concentración de 10 [mg/L], impulso N° 1, imagen realizada a través de Inteligencia Artificial.

MSO-X 3014A, MY51250157: Tue Feb 20 23:58:21 2018



Fuente: Elaboración propia.

4.5. Tangente Delta

Las condiciones climáticas al momento de realizar el ensayo de tangente δ se presentan en la Tabla 4.3.

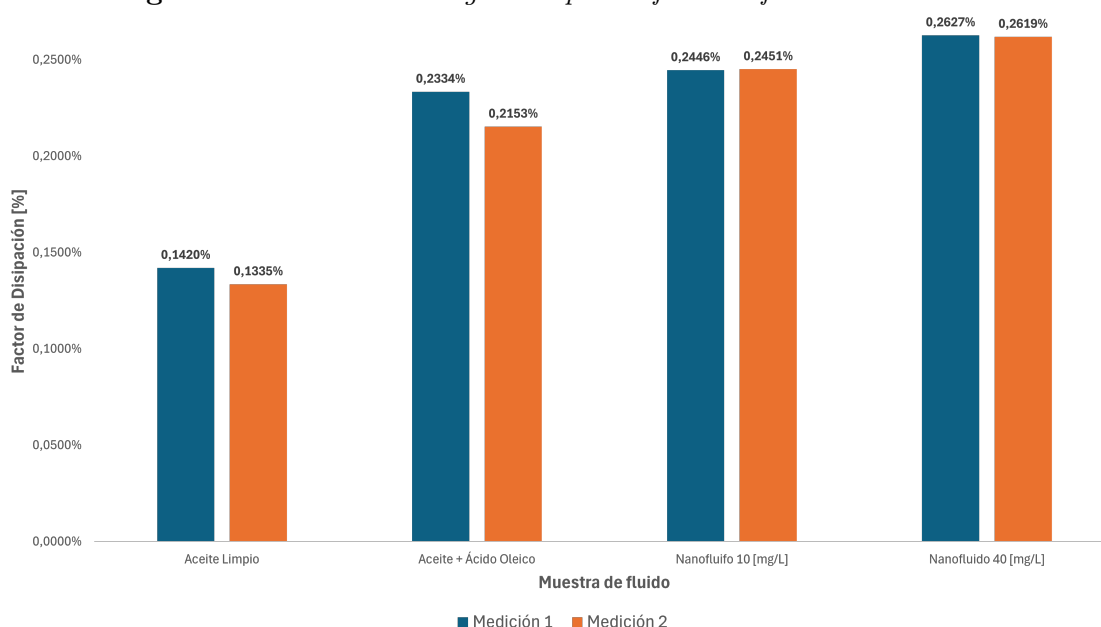
Tabla 4.4. Condiciones ambientales durante el ensayo de tangente δ o factor de disipación.

Temperatura [°C]	Humedad Relativa [%]
20,5	42

Fuente: Elaboración propia.

La medición del tangente delta o Factor de Disipación (FD) de un fluido dieléctrico permite evaluar las pérdidas de energía y el grado de degradación del material aislante. Para este ensayo se utilizó la norma *ASTM D924-08*. El orden seguido en las mediciones fue iniciar con el aceite limpio, continuar con la mezcla de aceite con ácido oleico y finalizar con los nanofluidos, evaluando desde la menor hasta la mayor concentración. En la Figura 4.19 se presentan los valores obtenidos del tangente delta para cada una de las muestras ensayadas.

Figura 4.19. Datos de tangente δ para diferentes fluidos dieléctricos.

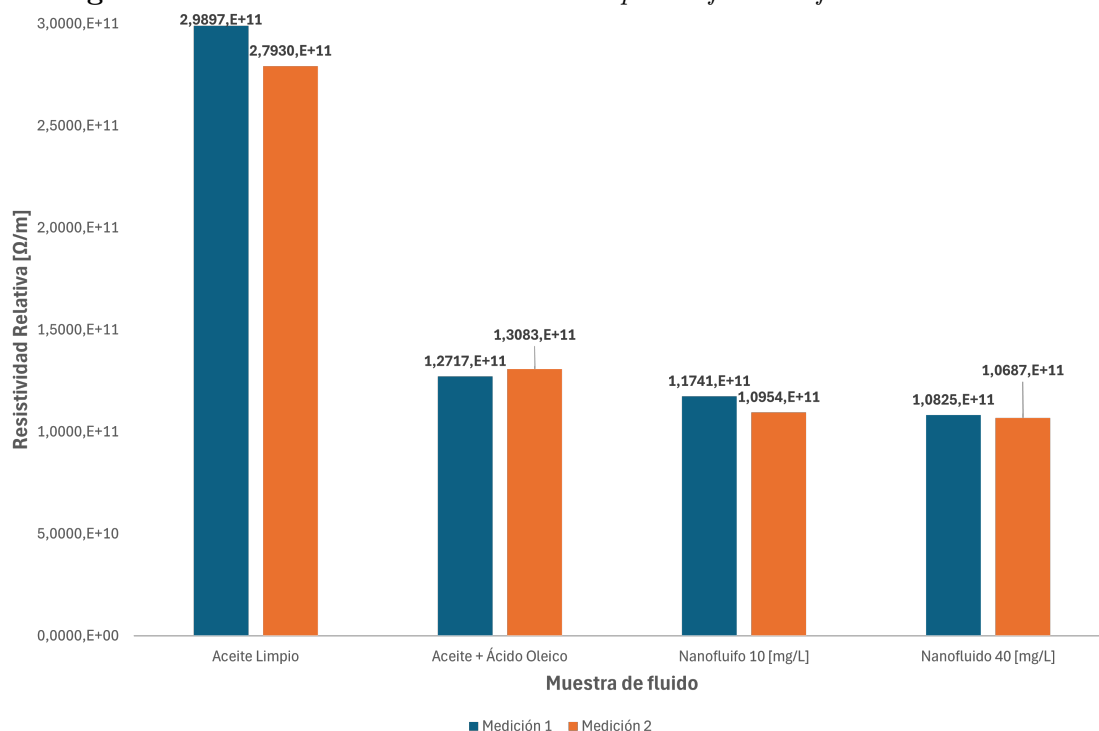


Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados presentados en la Figura 4.19, se observa que el aceite limpio presentó un factor de disipación promedio de 0,1378 %. En el caso del aceite con ácido oleico, el tangente δ promedio fue de 0,2244 %, lo que representa un incremento del 62,87 % respecto al fluido base.

Por su parte, los nanofluidos con concentraciones de 10 [mg/L] y 40 [mg/L] mostraron factores de disipación promedios de 0,2449 % y 0,2623 % respectivamente. Estos valores corresponden a aumentos del 77,75 % y 90,42 % en comparación con el aceite limpio.

Las mediciones fueron realizadas con el equipo *TOR-3 LSL*, el cual también permite determinar la resistividad relativa de cada muestra. Los resultados obtenidos para esta variable se presentan en la Figura 4.20.

Figura 4.20. Datos de resistividad relativa para diferentes fluidos dieléctricos.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 4.20, existe una disminución significativa en la resistividad relativa tras la incorporación de aditivos al fluido base. El aceite limpio presentó el mayor valor de resistividad relativa, con un promedio de $2,891 \cdot 10^{11} [\Omega \cdot m]$. Al incorporar ácido oleico, la resistividad disminuyó en un 55,38 %, mientras que para los nanofluidos con concentraciones de 10 [mg/L] y 40 [mg/L] se observaron reducciones del 60,75 % y 62,80 % respectivamente.

Con base en los resultados de las Figuras 4.19 y 4.20, se concluye que la adición de ácido oleico y nanopartículas genera un aumento en el factor de disipación y una disminución considerable de la resistividad relativa. El cambio más significativo en el tangente δ se produce con la incorporación del ácido oleico, lo que puede atribuirse a un aumento en la viscosidad del aceite y a su carácter polar, que altera negativamente las propiedades dieléctricas del fluido base. Esto implica un mayor nivel de pérdidas dieléctricas. Asimismo, la marcada disminución en la resistividad relativa al agregar el surfactante podría explicarse por una mayor conductividad del fluido, producto de la posible presencia de impurezas o trazas de humedad, así como por la polaridad del grupo funcional presente en el ácido oleico.

Capítulo 5

Conclusiones

El análisis morfológico de la nanopartícula, realizado mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM), permitió identificar la presencia de nanopartículas con tamaños en el rango de 20 a 50 [nm]. Por otro lado, el difractograma de rayos X permitió determinar la composición estructural de la nanopartícula $NiCo_2O_4$, demostrando la fase característica del compuesto.

El estudio de rigidez dieléctrica permitió evaluar el impacto de la incorporación de nanopartículas en el fluido base. Los resultados obtenidos evidencian que el uso combinado de ácido oleico y nanopartículas de $NiCo_2O_4$ mejora considerablemente la rigidez dieléctrica respecto del aceite base, observándose incrementos del 62,7 % y 88,0 % para concentraciones de 10 [mg/L] y 40 [mg/L], como se ve en la Tabla 4.2.

Respecto al análisis de absorbancia mediante espectroscopía UV-Visible, este permitió examinar el efecto de las nanopartículas de $NiCo_2O_4$ sobre la absorción de energía en distintos rangos de longitud de onda. Si bien las distintas muestras presentaron comportamientos similares, en el rango de bajas longitudes de onda (325–380 [nm]) se observaron diferencias según la composición de la muestra. La presencia de nanopartículas incrementó la absorción de energía en comparación con el aceite base, aunque no se observaron diferencias significativas entre las distintas concentraciones de nanofluido. De igual manera, en el rango de altas longitudes de onda (880–980 [nm]) se observó una mayor absorbancia en presencia de nanopartículas, destacando el nanofluido con concentración de 40 [mg/L]. No obstante, la diferencia entre ambas concentraciones no fue tan relevante como la existente entre estas y el fluido base, esto indica que el nanofluido presenta una alta estabilidad al compararlo con el aceite base.

El análisis de los ensayos de impulso tipo rayo también evidenció un incremento en la rigidez dieléctrica al incorporar nanopartículas, mejorando la capacidad del fluido para soportar tensiones antes de su ruptura. En este contexto, el nanofluido con concentración de 10 [mg/L] presentó el mejor rendimiento en soportar el estrés eléctrico, lo cual sugiere la existencia de una concentración óptima de nanopartículas que maximiza las propiedades dieléctricas del fluido.

En cuanto a los resultados del ensayo de tangente δ o factor de disipación, no se observaron aumentos significativos al añadir nanopartículas, lo cual indica que la presencia de $NiCo_2O_4$ no incrementa de manera considerable las pérdidas energéticas del fluido. Sin embargo, el uso de ácido oleico sí produjo un aumento relevante en este parámetro, lo que demuestra su mayor impacto sobre la disipación de energía.

En función de los antecedentes expuestos, se concluye que la incorporación conjunta de ácido oleico y nanopartículas de $NiCo_2O_4$ permite mejorar tanto la rigidez dieléctrica como la capacidad de absorción de energía del aceite dieléctrico. Estas mejoras se atribuyen al efecto estabilizante del ácido oleico, que forma una capa protectora alrededor de las nanopartículas, impidiendo su aglomeración y la formación de trayectorias conductivas. Como trabajo futuro, se considera relevante investigar el efecto del uso de nanopartículas de $NiCo_2O_4$ sobre el envejecimiento de aceites dieléctricos y su comportamiento en aplicaciones de alta tensión. Asimismo, se recomienda estudiar en mayor profundidad la influencia de la concentración de nanopartículas y el volumen de ácido oleico sobre las propiedades dieléctricas del fluido base.

Capítulo 6

Anexos

6.1. Rigidez Dielectrica

Los datos obtenidos tras realizar el ensayo de rigidez dieléctrica, son los presentados en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. *Resultados de tensión de ruptura, promedio, desviación estándar y desviación porcentual para cada fluido.*

N° de ruptura	Fluido			
	Aceite [kV]	Aceite + Ácido Oleico [kV]	Nanofluido 10 [mg/L] [kV]	Nanofluido 40 [mg/L] [kV]
1	50,0	56,6	72,9	72,4
2	73,6	37,1	53,2	75,0
3	69,2	52,2	58,6	67,6
4	73,2	53,2	58,3	66,8
5	71,9	53,4	61,4	72,1
6	58,3	45,8	61,5	68,9
Promedio [kV]	66,0	49,7	61,0	70,5
Desviación Estándar [kV]	9,7	7,1	6,6	3,2
Desviación Porcentual [%]	14,6 %	14,3 %	10,8 %	4,5 %

Fuente: *Elaboración propia.*

En el caso del aceite mineral limpio, se realizó más ensayos de rigidez dieléctrico para corroborar los valores obtenidos en primera instancia, los resultados que se tuvieron son los mostrados en la 6.2.

Tabla 6.2. Resultados de tensión de ruptura para seis pruebas distintas de Aceite Mineral.

N° de ruptura	N° de prueba					
	1	2	3	4	5	6
1	25,9	33,6	39,3	24,2	35,4	41,6
2	28,2	37,0	43,9	20,8	30,4	40,3
3	27,6	34,0	26,7	21,3	30,0	43,4
4	25,9	31,2	29,0	23,9	28,4	42,2
5	29,0	35,7	44,6	29,7	36,0	41,7
6	30,4	34,5	41,5	30,9	38,0	43,4
Promedio [kV]	27,8	34,3	37,5	25,1	33,0	42,1
Desviación Estándar [kV]	1,8	2,0	7,7	4,2	3,9	1,2
Desviación Porcentual [%]	6 %	6 %	21 %	17 %	12 %	3 %

Fuente: Elaboración propia.

6.2. UV-Visible

6.3. Impulso tipo rayo

Los datos obtenidos para el caso del aceite mineral limpio son los mostrados en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Tensiones de ruptura para muestra de Aceite Limpio.

Aceite Limpio					
N°	Tensión [kV]	N°	Tensión [kV]	N°	Tensión [kV]
1	-44,36	21	-53,28	41	-53,08
2	-44,42	22	-50,50	42	-53,09
3	-43,12	23	-54,65	43	-53,04
4	-43,32	24	-53,21	44	-53,39
5	-43,40	25	-53,49	45	-53,06
6	-45,92	26	-53,64	46	-53,42
7	-46,11	27	-53,55	47	-53,00
8	-46,35	28	-53,48	48	-53,08
9	-46,03	29	-53,63	49	-53,03
10	-45,36	30	-53,53	50	-53,13
11	-50,36	31	-53,25	51	-53,22
12	-50,08	32	-53,05	52	-53,08
13	-50,40	33	-53,28	53	-53,17
14	-50,27	34	-53,48	54	-53,06
15	-50,43	35	-53,80	55	-53,13
16	-53,96	36	-53,82	56	-53,30
17	-53,49	37	-53,84	57	-53,17
18	-53,86	38	-54,23	58	-53,40
19	-53,96	39	-54,08	59	-53,43
20	-54,00	40	-54,28	60	-53,42

Fuente: Elaboración propia.

Los valores promedio de tensión y coeficiente de variación para el aceite mineral limpio son presentados en la Tabla 6.4

Tabla 6.4. *Análisis estadístico de la tensión de ruptura para aceite limpio.*

Aceite Limpio			
Tensión Prom. [kV]	Tensión Prom. 1-20 [kV]	Tensión Prom. 21-40 [kV]	Tensión Prom. 41-60 [kV]
-51,80	-48,54	-53,42	-53,44
Desv. Estándar	Coef. Var. 1-20 [%]	Coef. Var. 21-40 [%]	Coef. Var. 41-60 [%]
3,31	8,2	1,4	0,5

Fuente: *Elaboración propia.*

Para el aceite mineral se repitió el ensayo de impulso tipo rayo, obteniendo los valores que se encuentran en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5. *Tensiones de ruptura para muestra de Aceite Limpio en la 2^{da} prueba.*

Aceite Limpio					
Nº	Tensión [kV]	Nº	Tensión [kV]	Nº	Tensión [kV]
1	-57,22	21	-57,66	41	-57,29
2	-57,53	22	-57,19	42	-57,49
3	-57,06	23	-57,16	43	-57,75
4	-57,17	24	-57,33	44	-57,53
5	-57,25	25	-57,26	45	-57,57
6	-57,17	26	-57,42	46	-57,60
7	-57,36	27	-57,45	47	-57,13
8	-57,30	28	-57,58	48	-57,41
9	-57,26	29	-57,61	49	-57,28
10	-57,38	30	-57,64	50	-57,50
11	-57,59	31	-57,26	51	-57,24
12	-57,69	32	-57,36	52	-57,56
13	-57,22	33	-57,43	53	-57,61
14	-57,61	34	-57,18	54	-57,43
15	-57,47	35	-57,41	55	-57,35
16	-57,48	36	-57,48	56	-57,57
17	-57,45	37	-57,78	57	-57,36
18	-57,35	38	-57,67	58	-57,23
19	-57,66	39	-57,22	59	-57,38
20	-57,43	40	-57,16	60	-57,48

Fuente: *Elaboración propia.*

Para esta segunda prueba realizada la tensión promedio que se obtuvieron, desviación estandar y coeficiente de variación son los que se encuentran en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6. *Análisis estadístico de la tensión de ruptura para Aceite Limpio en la 2^{da} prueba.*

Aceite Limpio			
Tensión Promedio [kV]	Tensión Prom. 1-20 [kV]	Tensión Prom. 21-40 [kV]	Tensión Prom. 41-60 [kV]
-57,41	-57,38	-57,41	-57,44
Desv. Estándar	Coef. Var. 1-20 [%]	Coef. Var. 21-40 [%]	Coef. Var. 41-60 [%]
0,17	0,3	0,3	0,3

Fuente: *Elaboración propia.*

En el caso de la muestra de aceite con ácido oleico, se tienen los datos de tensión de ruptura en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7. *Tensiones de ruptura para muestra de Aceite con Ácido Oleico.*

Aceite + Ácido Oleico					
Nº	Tensión [kV]	Nº	Tensión [kV]	Nº	Tensión [kV]
1	-46,17	21	-56,45	41	-55,54
2	-46,38	22	-56,33	42	-55,81
3	-46,26	23	-56,37	43	-55,96
4	-46,26	24	-55,81	44	-56,30
5	-46,98	25	-56,61	45	-56,28
6	-50,74	26	-56,38	46	-56,44
7	-50,48	27	-56,19	47	-56,40
8	-50,77	28	-56,37	48	-56,57
9	-50,89	29	-56,08	49	-56,11
10	-50,56	30	-56,78	50	-56,37
11	-56,69	31	-56,45	51	-53,12
12	-56,21	32	-56,55	52	-56,60
13	-56,41	33	-56,40	53	-56,41
14	-56,18	34	-56,16	54	-56,55
15	-56,36	35	-56,02	55	-56,42
16	-56,33	36	-56,29	56	-56,61
17	-55,82	37	-56,21	57	-56,31
18	-55,77	38	-55,51	58	-56,24
19	-55,89	39	-56,21	59	-56,66
20	-56,46	40	-55,95	60	-55,98

Fuente: *Elaboración propia.*

La tensión promedio y sus respectivos coeficientes de variación para el ensayo realizado a la muestra de aceite con ácido oleico son los mostrados en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8. *Análisis estadístico de la tensión de ruptura para aceite con ácido oleico.*

Aceite + Ácido Oleico			
Tensión Prom. [kV]	Tensión Prom. 1-20 [kV]	Tensión Prom. 21-40 [kV]	Tensión Prom. 41-60 [kV]
-54,92	-52,38	-56,26	-56,13
Desv. Estándar	Coef. Var. 1-20 [%]	Coef. Var. 21-40 [%]	Coef. Var. 41-60 [%]
3,05	7,9	0,5	1,3

Fuente: *Elaboración propia.*

Al igual que para el aceite mineral limpio, para el aceite con ácido oleico se repitió el ensayo de impulso tipo rayo, donde se obtuvieron las tensiones de ruptura presentadas en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9. Tensiones de ruptura para muestra de Aceite con Ácido Oleico en la 2^{da} prueba.

Aceite + Ácido Oleico					
Nº	Tensión [kV]	Nº	Tensión [kV]	Nº	Tensión [kV]
1	-61,07	21	-61,33	41	-61,55
2	-61,09	22	-61,22	42	-61,82
3	-60,80	23	-61,56	43	-61,29
4	-61,35	24	-60,78	44	-60,64
5	-60,76	25	-61,37	45	-61,22
6	-61,57	26	-61,64	46	-61,25
7	-61,66	27	-61,37	47	-61,28
8	-61,36	28	-61,30	48	-61,14
9	-61,40	29	-61,02	49	-61,22
10	-61,75	30	-61,54	50	-60,97
11	-61,57	31	-61,44	51	-61,46
12	-61,67	32	-61,41	52	-59,89
13	-61,31	33	-61,25	53	-61,12
14	-61,20	34	-61,56	54	-61,24
15	-61,26	35	-61,45	55	-61,38
16	-61,65	36	-61,35	56	-60,20
17	-61,33	37	-61,43	57	-61,21
18	-60,40	38	-61,21	58	-61,24
19	-61,37	39	-61,64	59	-61,21
20	-61,50	40	-61,16	60	-61,32

Fuente: Elaboración propia.

Para la segunda prueba en el aceite con ácido oleico se obtuvo como tensión promedio, desviación estandar y coeficiente de variación los valores presentes en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10. Análisis estadístico de la tensión de ruptura para Aceite + Ácido Oleico en la 2^{da} prueba.

Aceite + Ácido Oleico			
Tensión Promedio [kV]	Tensión Promedio 1-20 [kV]	Tensión Promedio 21-40 [kV]	Tensión Promedio 41-60 [kV]
-61,26	-61,30	-61,35	-61,13
Desviación Estándar	Coeficiente de Variación 1-20 [%]	Coeficiente de Variación 21-40 [%]	Coeficiente de Variación 41-60 [%]
0,35	0,5	0,3	0,7

Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos en la tensión de ruptura para el nanofluido de concentración 10 [mg/L] son los presentados en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11. *Tensiones de ruptura para muestra de NanoFluido 10 [mg/L].*

NanoFluido 10 [mg/L]					
Nº	Tensión [kV]	Nº	Tensión [kV]	Nº	Tensión [kV]
1	-76,94	21	-77,10	41	-77,00
2	-76,85	22	-76,88	42	-76,80
3	-76,99	23	-76,80	43	-76,87
4	-77,22	24	-76,82	44	-77,06
5	-76,96	25	-76,71	45	-76,91
6	-76,84	26	-76,84	46	-76,75
7	-76,97	27	-77,06	47	-76,57
8	-77,23	28	-77,74	48	-76,66
9	-77,14	29	-76,93	49	-76,83
10	-76,99	30	-76,72	50	-76,85
11	-76,95	31	-76,96	51	-77,16
12	-77,14	32	-76,90	52	-76,93
13	-76,86	33	-76,72	53	-76,96
14	-76,79	34	-77,02	54	-77,06
15	-77,10	35	-76,67	55	-77,04
16	-77,25	36	-76,69	56	-76,98
17	-77,17	37	-76,66	57	-77,14
18	-77,08	38	-77,04	58	-76,79
19	-76,78	39	-76,97	59	-76,89
20	-76,90	40	-76,77	60	-76,77

Fuente: Elaboración propia.

La tensión promedio total y por tramos, la desviación estándar y el coeficiente de variación de los datos están presentados en la Tabla 6.12

Tabla 6.12. *Análisis estadístico de la tensión de ruptura para NanoFluido 10 [mg/L].*

NanoFluido 10 [mg/L]			
Tensión Prom. [kV]	Tensión Prom. 1-20 [kV]	Tensión Prom. 21-40 [kV]	Tensión Prom. 41-60 [kV]
-76,94	-77,01	-76,90	-76,90
Desv. Estándar	Coef. Var. 1-20 [%]	Coef. Var. 21-40 [%]	Coef. Var. 41-60 [%]
0,19	0,2	0,3	0,2

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, los datos obtenidos para el nanofluido de concentración 40 [mg/L] son los mostrados en la Tabla 6.13.

Tabla 6.13. Tensiones de ruptura para muestra de NanoFluido 40 [mg/L].

NanoFluido 40 [mg/L]					
Nº	Tensión [kV]	Nº	Tensión [kV]	Nº	Tensión [kV]
1	-65,15	21	-65,99	41	-65,75
2	-57,12	22	-66,03	42	-66,49
3	-66,44	23	-65,68	43	-65,59
4	-66,78	24	-65,70	44	-66,40
5	-66,59	25	-67,24	45	-66,30
6	-66,68	26	-66,37	46	-65,76
7	-65,97	27	-66,51	47	-66,86
8	-66,94	28	-65,90	48	-66,71
9	-66,92	29	-66,28	49	-66,39
10	-64,95	30	-64,75	50	-67,21
11	-66,01	31	-64,95	51	-66,67
12	-67,62	32	-66,60	52	-66,43
13	-65,49	33	-66,25	53	-65,75
14	-67,02	34	-64,23	54	-66,80
15	-67,13	35	-67,02	55	-66,13
16	-66,02	36	-65,99	56	-66,16
17	-65,18	37	-66,76	57	-66,14
18	-66,75	38	-66,71	58	-65,08
19	-64,79	39	-66,37	59	-65,18
20	-65,61	40	-66,48	60	-65,02

Fuente: Elaboración propia.

Para este caso la tensión media total y por cada 20 impulsos, la decisión estándar y el coeficiente de variación de los datos obtenidos se presentan en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14. Análisis estadístico de la tensión de ruptura para NanoFluido 40 [mg/L].

NanoFluido 40 [mg/L]			
Tensión Promedio [kV]	Tensión Promedio 1-20 [kV]	Tensión Promedio 21-40 [kV]	Tensión Promedio 41-60 [kV]
-66,00	-65,76	-66,09	-66,14
Desviación Estándar	Coef. de Variación 1-20 [%]	Coef. de Variación 21-40 [%]	Coef. de Variación 41-60 [%]
1,37	3,2	1,1	0,9

Fuente: Elaboración propia.

6.4. Tangente delta

Los resultados obtenidos del factor de disipación tras realizar las dos mediciones para cada muestra y hacer un promedio de estas, son las presentadas en la Tabla 6.15:

Tabla 6.15. Valores de tangente delta ($tg \delta$) para diferentes muestras

Muestra	Medición 1	Medición 2	Promedio
Aceite Limpio	0,1420 %	0,1335 %	0,1378 %
Aceite + Ácido Oleico	0,2334 %	0,2153 %	0,2244 %
Nanofluido 10 [mg/L]	0,2446 %	0,2451 %	0,2449 %
Nanofluido 40 [mg/L]	0,2627 %	0,2619 %	0,2623 %

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan en la Tabla 6.16 los datos obtenidos con respecto a la resistividad relativa para cada muestra:

Tabla 6.16. *Resistividad Relativa [Ohm/m] para diferentes muestras*

Muestra	Medición 1	Medición 2	Promedio
Aceite Limpio	$2,9897 \times 10^{11}$	$2,7930 \times 10^{11}$	$2,8913 \times 10^{11}$
Aceite + Ácido Oleico	$1,2717 \times 10^{11}$	$1,3083 \times 10^{11}$	$1,2900 \times 10^{11}$
Nanofluido 10 [mg/L]	$1,1741 \times 10^{11}$	$1,0954 \times 10^{11}$	$1,1347 \times 10^{11}$
Nanofluido 40 [mg/L]	$1,0825 \times 10^{11}$	$1,0687 \times 10^{11}$	$1,0756 \times 10^{11}$

Fuente: *Elaboración propia.*

Bibliografía

- [1] M. Wang, A. J. Vandermaar, and K. D. Srivastava, “Review of condition assessment of power transformers in service,” 11 2002.
- [2] A. R. Abbasi, “Fault detection and diagnosis in power transformers: a comprehensive review and classification of publications and methods,” 8 2022.
- [3] R. Murugan and R. Ramasamy, “Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 55, pp. 182–192, 2015.
- [4] M. Rafiq, M. Shafique, A. Azam, and M. Ateeq, “Transformer oil-based nanofluid: The application of nanomaterials on thermal, electrical and physicochemical properties of liquid insulation-a review,” 3 2021.
- [5] M. Hussain, F. A. Mir, and M. A. Ansari, “Nanofluid transformer oil for cooling and insulating applications: A brief review,” 4 2022.
- [6] S. U. S. Choi, J. A. Eastman, and J. A. Eastman, “Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles,” tech. rep., 1935.
- [7] T. Tsovilis, G. Peppas, E. Staikos, A. Hadjicostas, and Z. Datsios, “Exploring the surge current degradation of natural ester oil-based nanofluids,” *Scientific Reports*, vol. 14, 12 2024.
- [8] M. Nazari, M. H. Rasoulifard, and H. Hosseini, “Dielectric breakdown strength of magnetic nanofluid based on insulation oil after impulse test,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 399, pp. 1–4, 2 2016.
- [9] Y. Z. Lv, L. F. Wang, X. X. Li, Y. F. Du, J. Q. Zhou, and C. R. Li, “Experimental investigation of breakdown strength of mineral oil-based nanofluids,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, 2011.
- [10] A. Zambon and M. Córdoba, “Nanomaterials and intertheoretical relations: Macro and nanochemistry as emergent levels,” *Foundations of Science*, vol. 26, pp. 355–370, 6 2021.
- [11] I. Khan, K. Saeed, and I. Khan, “Nanoparticles: Properties, applications and toxicities,” 11 2019.
- [12] C. N. R. Rao, A. Müller, and A. K. Cheetham, “The chemistry of nanomaterials: Synthesis, properties and applications, 2 volumes,” 2004.

-
- [13] H. B. Bacha, N. Ullah, A. Hamid, and N. A. Shah, “A comprehensive review on nanofluids: Synthesis, cutting-edge applications, and future prospects,” 5 2024.
 - [14] J. A. A. Rey, “Separación de fuentes de descargas parciales y ruido eléctrico mediante análisis de potencia espectral en alta frecuencia,” 2014.
 - [15] I. E. Commission, “Iec 60060-1:2010; high-voltage test techniques. part 1, general definitions and test requirements,” 2010.
 - [16] I. E. Commission, “Insulating liquids - measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) and d.c. resistivity,” 2004.
 - [17] Terco, “Introduction to high voltage experiments,” tech. rep., 2011.
 - [18] I. E. Commission, “Insulating liquids – determination of the breakdown voltage at power frequency – test method.,” 1995.
 - [19] M. G. Limited, “The megger guide to insulating oil dielectric breakdown testing,” tech. rep., Megger Group Limited, 2016.
 - [20] M. Rizwan, S. A. Khan, M. R. Khan, and A. A. Khan, “Experimental and statistical investigation on the dielectric breakdown of magneto nanofluids for power applications,” *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, vol. 19, 7 2024.
 - [21] O. Thomas and C. Burgess, *UV-Visible Spectrophotometry of Waters and Soils*. Elsevier, 1 2022.
 - [22] M. R. Pavan and A. R. Barron, “Espectroscopia uv-visible,” tech. rep., 2024.
 - [23] A. S. for Testing and Materials, “Test method for dissipation factor (or power factor) and relative permittivity (dielectric constant) of electrical insulating liquids,” 10 2015.
 - [24] J. A. A. Rey, “Métodos de evaluación del nivel de aislamiento,” 2023.
 - [25] Baur, “Ensayo de aceites aislantes: ensayador de aceites aislantes portátiles,” tech. rep., 2020.
 - [26] Globecore, “Tor-3 (tor-3 lsl) tangente delta del aceite,” tech. rep., 2025.