

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



ANÁLISIS DEL ENVEJECIMIENTO DEL ACEITE
DE UN TRANSFORMADOR MEDIANTE
ESPECTROSCOPIA DIELECTRICA MEDIDA EN
BAJA FRECUENCIA

Ingeniería Técnica Industrial: Electricidad

AUTOR: Pedro Reis Tenajas

DIRECTOR Y TUTOR: Simón Dávila Solano

Al Santo Job.



ÍNDICE GENERAL.

Índice de figuras.....	iv
Índice de tablas.....	vi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. SISTEMA DE AISLAMIENTO DEL TRANSFORMADOR.	3
2.1. Características del papel como material aislante.....	5
2.2. Características del pressboard como material aislante.....	7
2.3. Características del papel-aceite como material aislante	8
3. ACEITE MINERAL AISLANTE.....	9
3.1. Clasificación.....	9
3.1.1. Hidrocarburos clorados.....	9
3.1.2. Hidrocarburos sintéticos.....	10
3.1.3. Aceites derivados del petróleo.....	10
3.1.4. Aceites de silicona.....	11
3.1.5. Esteres.....	12
3.2. Composición interna del aceite mineral.....	13
3.3. Características.....	16
3.4. Procesos de fabricación.	19
3.4.1. Fabricación de los aceites base.....	19
3.4.2. Aditivos del aceite mineral.....	20
3.5. Degradación del aceite como aislante.....	21
3.5.1. Factores que deterioran el estado del aceite.	21
3.5.2. Envejecimiento del aceite mineral aislante.	23
4. ESPECTROSCOPIA DIELÉCTRICA.....	25
4.1. Respuesta dieléctrica.	25
4.1.1. Función de la respuesta dieléctrica.....	26
4.1.2. Respuesta dieléctrica en el dominio del tiempo.	27
4.1.3. Respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia.....	32
4.2. Pérdidas dieléctricas.	34



4.3. Permitividad dieléctrica.	36
4.4. Usos de la espectroscopía dieléctrica.....	38
5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	41
5.1. Metodología del ensayo.....	41
5.1.1. Celda de envejecimiento.....	41
5.1.2. Montaje del experimento	42
5.1.3. Contenido de humedad en el aceite.	43
5.2. Equipos utilizados.	44
5.2.1. Celda de líquidos	44
5.2.2. IDA 200. Sistema de diagnóstico del aislamiento	46
6. RESULTADOS.....	49
6.1. Mediciones del factor de disipación ($\tan \delta$)	49
6.1.1. Efecto de la tensión de medición en la $\tan \delta$ de las muestras	54
6.1.2. Variación de la $\tan \delta$ en función del tiempo de envejecimiento.....	58
6.2. Mediciones de la capacitancia (c)	59
6.2.1. Efecto de la tensión de medición en la capacidad.	64
6.2.2. Variación de la C en función del tiempo de envejecimiento.....	68
6.3. Mediciones de la conductividad (σ)	70
6.3.1. Efecto de la tensión de medición en la σ de las muestras.....	74
6.3.2. Variación de la σ en función del tiempo de envejecimiento	77
7. COROLARIO	79
7.1. Conclusiones	79
7.1.1. Factor de pérdidas.....	79
7.1.2. Capacidad	79
7.1.3. Conductividad.....	80
7.2. Recomendaciones	80
8. BIBLIOGRAFÍA.....	82



Índice de figuras.

Ilustración 1: Esquema representativo de un sistema eléctrico de potencia.....	3
Ilustración 2: Composición química de la celulosa.....	5
Ilustración 3: Estructura molecular de constituyentes de los aceites minerales.....	10
Ilustración 4: Absorción de gas de hidrógeno: (1) alquibenceno y (2) aceite mineral...	11
Ilustración 5: Características esenciales de los esteres.....	12
Ilustración 6: Hidrocarburos parafinicos.....	14
Ilustración 7: Hidrocarburos nafténicos.....	14
Ilustración 8: Hidrocarburos aromáticos.....	15
Ilustración 9: Esquema simplificado del proceso de oxidación.....	20
Ilustración 10: Respuesta de la polarización frente a un escalón de tensión E_0 en $t=t_0$..	29
Ilustración 11: Principio de medida de la corriente de polarización y despolarización.	31
Ilustración 12: Esquema de la técnica de medida del PDC.....	31
Ilustración 13: Parte real de la capacidad.....	34
Ilustración 14: Tangente de pérdidas.....	34
Ilustración 15: Vectores E , D y J_d en un dieléctrico sometido a un campo sinusoidal...	35
Ilustración 16: Curvas de dispersión ($\epsilon'(\omega)$) y de los picos de absorción ($\epsilon''(\omega)$).....	36
Ilustración 17: Medida de la corriente para muestras con diferentes configuraciones...	39
Ilustración 18: Comparativa entre capacidad y la tangente de pérdidas.....	39
Ilustración 19: Detalles de la Celda de Envejecimiento.....	41
Ilustración 20: Resistencia de calentamiento.....	42
Ilustración 21: Montaje de las celdas de envejecimiento.....	42
Ilustración 22: Montaje del sistema de monitorización de T^a y calentamiento.....	43
Ilustración 23: Celda de líquidos acotada.....	45
Ilustración 24: Equipo de medida de la respuesta dieléctrica en el dominio del tiempo	46
Ilustración 25: Diagrama esquemático de bloques del sistema IDA 200.....	47
Ilustración 26: Principio de la técnica de correlación sinusoidal.....	47
Ilustración 27: Imprecisión en la medición del IDA_200.....	48
Ilustración 28: Tang δ para un envejecimiento con 1kV y tensión IDA de 5V.....	49
Ilustración 29: Tag δ de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 1kV.....	51
Ilustración 30: Tang δ para un envejecimiento con 0.5kV y tensión IDA de 5V.....	51
Ilustración 31: Tag δ de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 0,5kV.....	52
Ilustración 32: Tang δ para un envejecimiento con 0kV y tensión IDA de 5V.....	53
Ilustración 33: Tag δ de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 0V.....	54
Ilustración 34: Tang δ para un envejecimiento con 1kV y tensión IDA de 5V.....	54
Ilustración 35: Tang δ para un envejecimiento con 1kV y tensión IDA de 140V.....	55
Ilustración 36: Tang δ para un envejecimiento con 0,5kV y tensión IDA de 5V.....	56
Ilustración 37: Tang δ para un envejecimiento con 0,5kV y tensión IDA de 140V.....	56
Ilustración 38: Tang δ para un envejecimiento con 0V y tensión IDA de 5V.....	57
Ilustración 39: Tang δ para un envejecimiento con 0V y tensión IDA de 140V.....	57
Ilustración 40: Factor de disipación con datos tomados a una frecuencia de 1mHz.....	58
Ilustración 41: Factor de disipación con datos tomados a una frecuencia de 1Hz.....	58
Ilustración 42: Factor de disipación con datos tomados a una frecuencia de 50Hz.....	59



Ilustración 43: Capacidad para un envejecimiento con 1kV y tensión IDA de 5V	60
Ilustración 44: C de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 1kV.	61
Ilustración 45: Capacidad para un envejecimiento con 0,5kV y tensión IDA de 5V	61
Ilustración 46: C de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 0,5kV.	62
Ilustración 47: Capacidad para un envejecimiento con 0V y tensión IDA de 5V	63
Ilustración 48: C de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 0V.	64
Ilustración 49: Capacidad para un envejecimiento con 1kV y tensión IDA de 5V	65
Ilustración 50: Capacidad para un envejecimiento con 1kV y tensión IDA de 140V	65
Ilustración 51: Capacidad para un envejecimiento con 0,5kV y tensión IDA de 5V	66
Ilustración 52: Capacidad para un envejecimiento con 0,5kV y tensión IDA de 140V.	66
Ilustración 53: Capacidad para un envejecimiento con 0V y tensión IDA de 5V	67
Ilustración 54: Capacidad para un envejecimiento con 0V y tensión IDA de 140V	67
Ilustración 55: Capacidad según el envejecimiento para $f=1\text{mHz}$	68
Ilustración 56: Capacidad según el envejecimiento para $f=1\text{Hz}$	69
Ilustración 57: Capacidad según el envejecimiento para $f=50\text{Hz}$	69
Ilustración 58: Conductividad con envejecimiento de 1kV y tensión IDA de 5V	70
Ilustración 59: σ de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 1kV	71
Ilustración 60: Conductividad con envejecimiento de 0,5kV y tensión IDA de 5V	71
Ilustración 61: σ de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 0,5kV	72
Ilustración 62: : Conductividad con envejecimiento de 0V y tensión IDA de 5V	73
Ilustración 63: σ de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 0V	74
Ilustración 64: Conductividad para un envejecimiento con 1kV y tensión IDA de 5V.	74
Ilustración 65: Conductividad con envejecimiento de 1kV y tensión IDA de 140V	75
Ilustración 66: Conductividad del aceite con 0,5kV y tensión IDA de 5V	75
Ilustración 67: Conductividad con envejecimiento a 0,5kV y tensión IDA de 140V	76
Ilustración 68: Conductividad para un envejecimiento con 0V y tensión IDA de 5V ...	76
Ilustración 69: σ del aceite envejecido a 0V y tensión IDA de 140V	77
Ilustración 70: Conductividad según el envejecimiento para $f=1\text{mHz}$	78
Ilustración 71: Conductividad según el envejecimiento para $f=1\text{Hz}$	78
Ilustración 72: Conductividad según el envejecimiento para $f=50\text{Hz}$	78



Índice de tablas.

Tabla 1: Propiedades químicas y eléctricas de los polibutilenos.....	11
Tabla 2: Características de los aceites aislantes.	13
Tabla 3: Composición general de los crudos.....	13
Tabla 4: Características típicas de las tres principales familias de hidrocarburos.....	15
Tabla 5: Distribución hidrocarbonada de los distintos tipos de aceites minerales.	16
Tabla 6: Características del aceite de los transformadores para distintas temperaturas. 17	
Tabla 7: Valores límite de las características del aceite durante un ensayo de rutina....	19
Tabla 8: Características de las Resistencias	42
Tabla 9: Equivalencia en horas de los tipos de aceites usados.....	43
Tabla 10: Contenido de humedad en aceite. Muestras envejecidas a 120°C.....	43
Tabla 11: Especificaciones técnicas de la celda de líquidos.	44
Tabla 12: Rangos y temperaturas de funcionamiento.	47
Tabla 13: Datos de la δ en muestras de aceite envejecidas a 1kV.....	50
Tabla 14: Datos de la δ en el aceite envejecido a 0,5kV.	52
Tabla 15: Datos de la δ de las muestras envejecidas sin tensión.....	53
Tabla 16: Datos de la δ en función del tiempo de envejecimiento.	58
Tabla 17: Datos de la C en las muestras de aceite envejecidas a 1kV.	60
Tabla 18: Datos de la C en las muestras de aceite envejecidas a 0,5kV.	62
Tabla 19: Datos de la C en las muestras de aceite envejecidas a 0V.	63
Tabla 20: Capacidad en las muestras de aceite según su envejecimiento.	68
Tabla 21: Conductividad de las muestras de aceite envejecidas a 1kV.....	70
Tabla 22: Conductividad de las muestras de aceite envejecidas a 0,5kV.....	72
Tabla 23: Conductividad del aceite envejecido sin tensión.....	73
Tabla 24: Conductividad de las muestras de aceite según su envejecimiento.....	77



1. INTRODUCCIÓN.

El transformador de potencia es una máquina eléctrica capaz de transformar una energía eléctrica de entrada con determinadas magnitudes de tensión y corriente en otra energía eléctrica de salida con magnitudes diferentes.

Hoy en día no se concibe el poder vivir sin el uso de la electricidad y por tanto sin el uso de estos transformadores que nos facilitan tanto el transporte como el suministro eléctrico, de ahí viene la importancia de su estudio, del análisis y mejora de sus fallos para un uso más eficiente del mismo pudiendo alargar la vida útil del mismo.

Esta duración de vida está directamente relacionada con la vida del papel y cartón aislante y del aceite dieléctrico, los tres componentes más importantes sujetos a la deteriorización y la contaminación.

Este proyecto se detiene en el estudio del envejecimiento del aceite mineral aislante de los transformadores de potencia, el cual nos muestra valiosa información sobre las condiciones de operación de los equipos que los usan.

Estos aceites son productos que sufren degradación por los esfuerzos térmicos y eléctricos a los que están continuamente sometidos, generando productos de descomposición que son utilizados para evaluar la presencia de un problema o falla en los transformadores.

Una de las magnitudes utilizadas para comprobar el envejecimiento del aceite es la permitividad dieléctrica en función de la frecuencia. En medios no magnéticos, nos informa totalmente de su respuesta electromagnética. La espectroscopía dieléctrica permite conocer parámetros fundamentales desde el punto de vista de la investigación científica básica y desde un punto de vista tecnológico, conocer la respuesta del material a cualquier señal electromagnética.

El objetivo de este trabajo es la caracterización de pequeñas muestras mediante espectroscopía en el dominio de la frecuencia (Frequency Domain Spectroscopy o FDS) calculando la permitividad dieléctrica compleja en baja frecuencia, en el rango de 1mHz a 1KHz. A su vez, estas medidas han sido realizadas a dos niveles de tensión, de 5V y 140V para poder tener más pruebas que certifiquen el diferente grado de envejecimiento según la tensión aplicada desde el punto de vista de la medición.

Tanto el fondo teórico como la metodología utilizada o los procedimientos de análisis y los resultados obtenidos son posteriormente explicados, más ampliamente y con detenimiento, en los siguientes capítulos de este libro.

Este proyecto ha estado limitado por el número de muestras ensayadas, ya que habría sido interesante haber realizado los ensayos a una mayor cantidad de muestras con el fin de dar una mayor validez estadística.



Summary.

The power transformer is an electrical device that transforms an input electrical energy with certain magnitudes of voltage and current into another output power with different magnitudes.

Today living without using energy seems inconceivable. Transformers which provide both transport and electricity supply are therefore essential. Hence comes the importance of their study and, of the analysis and improvement of their failures to reach a more efficient use which may extend their useful life.

This life expectancy is directly related to the life expectancies of the three most important components of a power transformer, the paper, the cardboard and the oil dielectric insulation which are subjected to deterioration and pollution.

In this project we focus on the study of aging of insulating oil for power transformers, which shows us valuable information about how the operators use them.

These oils are continually subjected to electrical and thermal stresses which deteriorate them. The breakdown products generated by the damage are used to assess the presence of a problem or a fault in the transformer.

A way to measure the oil aging is to use the evolution of the permittivity with the frequency. In a nonmagnetic environment it gives the complete electromagnetic response of the oil. With a dielectric spectroscopy it is possible to know fundamental parameters from a basic scientific research standpoint, and from a technological standpoint it is possible to know the material response to any electromagnetic signal.

The aim of this paper is the characterization of small samples by Frequency Domain Spectroscopy or FDS, calculating the complex dielectric permittivity at low frequency, with a range of 1MHz to 1 kHz. Then these measures have been undertaken at two levels of voltage, 5V and 140V in order to have more tests to certify the different level of aging as the applied voltage.

The theoretical background and the methodology used, or the analysis methods and its results are subsequently explained with more details in the following chapters of this book.

This project has been limited by the number of samples tested; however it would have been interesting to carry out the tests to a larger number of samples in order to give greater statistical validity.

2. SISTEMA DE AISLAMIENTO DEL TRANSFORMADOR.

Actualmente se requiere transportar grandes cantidades de fluido eléctrico desde las fuentes de generación hasta los centros de consumo por lo que es fundamental el desarrollo de ciertos equipos eléctricos como es el caso de los transformadores.

Conforme a la demanda eléctrica iba en aumento, la industria eléctrica también fue teniendo un mayor crecimiento, por lo que la dificultad de trasladar este tipo de energía de un lugar a otro fue haciéndose más evidente, pues en sus principios se generaba corriente directa a baja tensión para alimentar los circuitos de alumbrado y de fuerza motriz, esto hacia, sumamente ineficiente la transmisión de grandes bloques de energía. Se vio entonces la necesidad de elevar la tensión en los centros de generación para llevar a cabo la transmisión de energía y reducirlo al llegar a los centros de carga o consumo. [1]

El dispositivo ideal para llevar a cabo este proceso de transformación es el transformador, cambiándose con ello, el uso de la corriente directa a corriente alterna, dado que el transformador funciona solo con corriente alterna.

A través de un diagrama unifilar se representa desde la generación hasta la utilización de la potencia eléctrica. Las grandes plantas de generación o estaciones centrales, generan energía en forma masiva, la cual es luego transmitida a subestaciones en puntos cercanos a los sitios donde será utilizada, y posteriormente la energía será distribuida desde dichas subestaciones hasta los usuarios.

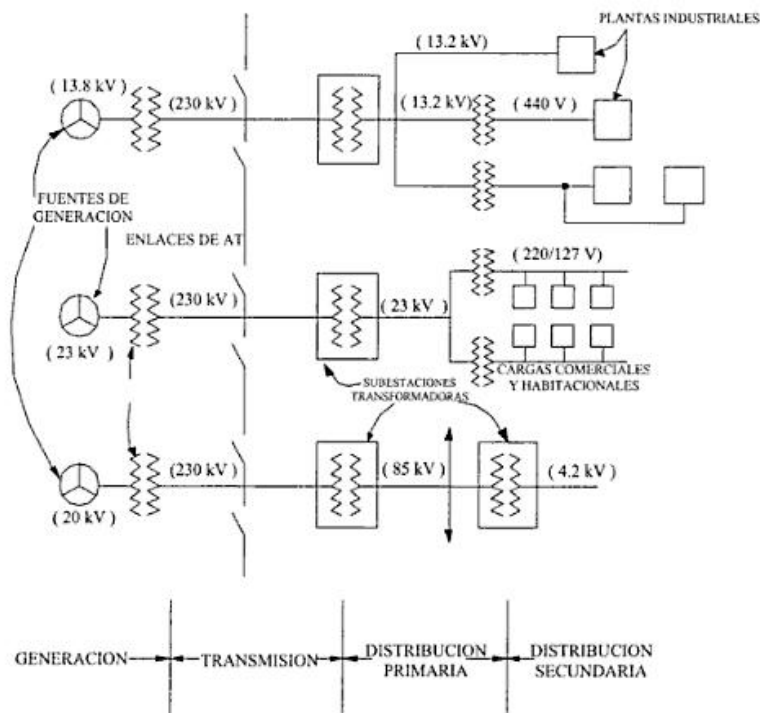


Ilustración 1: Esquema representativo de un sistema eléctrico de potencia.



Se observa que para poder llevar la energía a los centros de consumo desde las fuentes de generación, es necesario el uso de cuanto menos cuatro transformadores, los cuales tienen una función determinada. Como regla general podemos decir que, por cada kVA generados se requieren al menos cuatro kVA de transformación.

Estas unidades se encuentran, normalmente, formando subestaciones eléctricas y según el empleo que se les dé, reciben el nombre de transformadores de potencia o de distribución, y pueden ser elevadores, reductores o de enlace. Existen además los transformadores especiales y los transformadores para instrumento que son empleados como auxiliares para conectar los aparatos para la medición, la protección y el control de los circuitos eléctricos de potencia.

Es necesario que el transformador disponga de un sistema de aislamiento, compuesto por una serie de materiales, los cuales, juntos forman una total protección para el trafo, siendo capaz de aislar las partes activas del equipo que se encuentran a potenciales diferentes (conductores entre sí, con respecto a la carcasa, a las chapas metálicas). [2]

La vida del transformador depende en gran medida del buen funcionamiento de su sistema de aislamiento y de la calidad que este disponga, la cual determina la fiabilidad de servicio de la máquina, puesto que es el elemento más sensible especialmente a temperaturas elevadas.

Se puede calcular de forma aproximada la vida útil de un aislante por medio de la ley de Montsinger, que es una particularización de la ley de Arrhenius:

$$t_{util} = C \cdot e^{-\alpha \cdot T} \quad (1)$$

en donde:

t_{util} Es la vida esperada, en años, para el aislante.

C Es una constante que depende de las características del material.

α Constante que depende de la clase térmica del material.

T Temperatura a la que está sometido permanentemente el aislante.

Las estructuras aislantes de los transformadores de potencia sumergidos en aceite están constituidas por los siguientes elementos:

- Aceite.
- Papel kraft aislante impregnado en aceite.
- Pressboard impregnado en aceite.

Dependiendo de la tensión entre espiras, el aislamiento entre estas puede ser un simple barniz para el caso de que esta tensión sea pequeña, para tensiones altas o secciones importantes de los conductores, el aislamiento se completa con cartón impregnado en aceite.

Tanto el papel como el cartón suelen tener como materia prima la celulosa, que procede de la pulpa de madera. Raras veces, el papel utilizado como aislante en un transformador de potencia, proviene de la pulpa de madera con algodón.

En cuanto a la disposición de las estructuras aislantes entre componentes, señalamos las siguientes:

- Aislamiento entre espiras: varias capas de papel enrollado sobre el conductor.
- Aislamiento entre capas: dos capas de papel en las bobinas extremas.
- Aislamiento entre bobinas: aceite de los canales de circulación o anillos de cartón.
- Aislamiento entre arrollamientos: aceite de los canales y tubos aislantes.
- Aislamiento respecto a la masa: en baja tensión, se coloca un tubo aislante entre este arrollamiento y el núcleo.

También se utilizan bloques aislantes de madera de haya laminada de alta calidad. [3]

2.1.Características del papel como material aislante

El papel está formado por fibras de celulosa extraída de compuestos formados por ésta, tales como las fibras de algodón, la madera, etc. Sin embargo, la celulosa no se encuentra en estado puro en la naturaleza. La fibra de algodón es, probablemente, la fuente natural de celulosa más pura que existe ya que contiene un 95% de ésta. Aún así, contiene, aproximadamente un 5% de otras sustancias.

La celulosa está asociada comúnmente a otras sustancias, tales como la lignina y las hemicelulosas. Dependiendo de las especies, la madera contiene, en seco, entre un 40 y un 50% de celulosa, entre un 15 y un 35% de lignina y entre un 25 y un 40% de hemicelulosas (pentosas).

Durante el proceso de fabricación del papel, la madera es tratada químicamente para reducir el contenido de la lignina y en pentosas. En los papeles para aislamiento eléctrico, el método más extendido es el proceso Kraft, a partir del cual, la madera es tratada con una mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) y sulfato de sodio (Na₂SO₄).

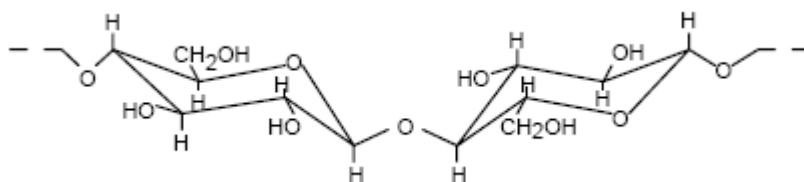


Ilustración 2: Composición química de la celulosa.

Después del tratamiento, la composición química del papel es la siguiente: 89% de celulosa, 7- 8% de pentosas y 3 - 4% de lignina.



La celulosa se puede definir como un polisacárido o polímero lineal formado por moléculas de anhidroglucopiranosas unidas entre sí mediante enlaces β -1.4-glicosídicos.

El papel además de celulosa contiene ligninas y hemicelulosas. Las ligninas son polímeros aromáticos complejos. Las hemicelulosas no son, a pesar de su desafortunado nombre, derivados de las celulosas y constituyen un gran número de polisacáridos unidos a las fibras de celulosa a través de enlaces de hidrógeno.

Dependiendo del proceso de fabricación, hay varios tipos de papel para aplicaciones eléctricas, como por ejemplo el papel Kraft, el papel Manila, el papel Manila/Kraft, etc.

El papel puede ser mejorado térmicamente mediante la adición de un estabilizador térmico, tal como la urea, la dicianidamida o la melanina. Este es el material más utilizado a la hora de usar aislamiento entre espiras y contra masa en la fabricación de transformadores de potencia, siendo su composición un 60% de pulpa de manila y un 40% de pulpa de papel Kraft (para el papel utilizado en la mayoría de estos casos).

El papel aislante usado en los transformadores de potencia tiene que tener unas características específicas.

Se utiliza papel con un espesor entre 30 y 120 μm , y una densidad aproximada entre 0.7 y 0.8 g/cm^3 . Es una práctica común especificar la masa por unidad de superficie (g/m^2), la cual es el producto del espesor por la densidad; por ejemplo, la masa por unidad de superficie de un papel de 30 μm de espesor y 0.7 g/cm^3 de densidad es 21 g/m^2 .

Una característica importante del papel es su resistencia a la tracción. No se expresa directamente, sino en unidades de la llamada longitud de tracción. La longitud de tracción es la longitud que alcanza una cinta de papel suspendida, con un espesor y una anchura uniformes, justo en el momento de su ruptura, bajo la fuerza de tracción producida por el propio peso muerto de la cinta. Para papeles utilizados con fines aislantes su valor es de 6 a 8 kN.

Las propiedades dieléctricas más importantes del papel, es decir, las que proporcionan la calidad al aislamiento, son la permitividad dieléctrica ϵ , el factor de pérdidas $\tan\delta$ y la conductividad σ (y por ende, su resistividad ρ). Siendo, de entre todas estas especificaciones eléctricas del papel, la propiedad más importante la rigidez dieléctrica a frecuencia nominal (50 ó 60 Hz), la cual tiene un valor aproximado de 100 a 150 kV/cm, en seco y aplicada a una fina capa.

La permitividad del papel seco varía de 1.5 a 3.5 y su factor de disipación (tangente de pérdidas: tangente de δ) varía entre 0.003 y 0.004. El papel seco tiene una alta resistividad, podemos obtener unos valores entre 10¹⁵ y 10¹⁷ $\Omega\cdot\text{cm}$. Sin embargo el papel tiene que estar protegido del contacto directo con la humedad para mantener sus propiedades dieléctricas, debido a la alta afinidad del papel al agua.



La permitividad de la materia prima del papel, es decir, de la celulosa, es mayor (entre 5 y 6). Esta diferencia se debe a que las fibras de celulosa no llenan uniforme y completamente el volumen del papel, dejando innumerables huecos, cuya permitividad entre fibras es igual a 1. Ocurre lo mismo con la rigidez dieléctrica del papel, que es inferior a la que presentan las fibras de celulosa.

Así mismo en el transformador existen áreas, las cuales soportan, altas tensiones eléctricas y mecánicas. Estas tensiones mecánicas pueden no ser soportadas por el papel aislante, y por esta razón, para determinadas condiciones se usa el pressboard prensado.

2.2. Características del pressboard como material aislante

El pressboard es, junto al papel, el material más importante del aislamiento celulósico ya que los anillos aislantes están fabricados con este material.

Existe un tipo de pressboard con una calidad especial, llamado “transformerboard”, generalmente usado en los grandes transformadores de potencia, que logra combinar las excelentes propiedades eléctricas del papel con las excepcionales propiedades mecánicas del pressboard. Además, tanto el proceso de secado como el de impregnación en aceite son sencillos y de fácil realización.

El procesado del pressboard se realiza comprimiendo varias capas finas de papel en un medio húmedo, sin necesidad de utilizar ningún tipo de material de unión. Dependiendo del espesor de la capa de pressboard se mejora la calidad final de dicho material, aumentando ésta cuanto más fina sea cada capa. [4]

Dependiendo de la tecnología de producción se distinguen esencialmente dos tipos de pressboard:

- *Pressboard calandrado*: obtenido por prensado, posteriormente secado sin presión y, finalmente, enrollado bajo unas condiciones de presión elevadas. La densidad del producto final es de 1.15 a 1.3 kg/dm³.
- *Pressboard precomprimido*: el proceso consiste en deshidratar el material, solidificarlo y secarlo. Su densidad está en torno a 1,25 kg/dm³.

Las propiedades eléctricas del pressboard impregnado en aceite son muy buenas: la rigidez dieléctrica a una presión de $2.7 \cdot 10^{-2}$ mbar es de 200 a 250 kV/cm. El factor de pérdidas dieléctricas es de $40 \cdot 10^{-4}$ a 130°C. La permitividad es de 4.4 a 4.5.

En cuanto a los peligros asociados a las descargas parciales, debe hacerse una distinción entre aquellas descargas que aparecen en la superficie del pressboard y aquellas que tienen lugar dentro del aislamiento. Éstas últimas son de una intensidad menor aunque son perjudiciales para el aislamiento y pueden, tarde o temprano, provocar un fallo. Mientras que las descargas sobre la superficie del pressboard, son de mayor intensidad aunque menos peligrosas ya que los tiempos de fallo son considerablemente mayores que en otros tipos de descargas parciales.



Las propiedades mecánicas del pressboard también son excelentes. La resistencia a la tracción del pressboard precomprimido de $1,25 \text{ kg/dm}^3$, que depende de la dirección de enrollamiento y del espesor de la capa, es de 95 a 125 N/mm^2 , y su elongación de 2.3 a 4.6% .

Más importante, sin embargo, es el comportamiento del aislamiento bajo compresión. La deformación permanente del pressboard en el caso de cargas estáticas (por ejemplo, las que ocurren en el transcurso del montaje) y en el caso de cargas dinámicas (por ejemplo, las que se originan por efectos de cortocircuitos) es pequeña; en cambio, su elasticidad es elevada. Sin embargo, hay diferencias entre el pressboard calandrado y el pressboard precomprimido. Se ha demostrado que, tras realizar diversos experimentos con cargas dinámicas bajo las mismas condiciones, el pressboard calandrado muestra un valor de deformación permanente mayor que el valor obtenido para el pressboard precomprimido. En cambio, el módulo de elasticidad es mayor para este último. [9]

2.3. Características del papel-aceite como material aislante

La rigidez dieléctrica del papel impregnado en aceite es mayor que la de cualquiera de los dos componentes por separado. La función del papel en el conjunto es repartir el aceite por los diminutos huecos. El papel es una masa enredada de fibras, parcialmente comprimida, que permite al aceite adoptar, entre fibras y láminas, una constitución física extremadamente fina, cuya rigidez dieléctrica es mucho mayor que la medida entre las capas gruesas del mismo aceite. La rigidez dieléctrica del aislamiento de papel impregnado en aceite está definida por la rigidez de esos pequeños espacios de aceite.

Hay un hecho que es importante señalar. Por un lado, la rigidez dieléctrica del aceite es menor que la de las fibras de papel; por otro lado, la permitividad del aceite es también menor. Por tanto, el aceite es el componente del sistema de aislamiento que se lleva la mayor parte del estrés eléctrico.

La rigidez dieléctrica del sistema papel-aceite depende, principalmente, del proceso de impregnación. También depende del éxito que se obtenga en la eliminación de los efectos de aquellos factores (temperatura, humedad y oxígeno) que reducen la rigidez del aislamiento. En los nuevos transformadores, la rigidez dieléctrica del papel impregnado en aceite es de 200 a 400 kV/cm , y su permitividad es de $3,5$.



3. ACEITE MINERAL AISLANTE.

El aceite mineral aislante es un elemento esencial en el funcionamiento del transformador. Posee unas excelentes características físicas, químicas y eléctricas para ser utilizado con fines aislantes y refrigerantes. También se erige como un medio ideal para detectar defectos del transformador y del resto de componentes del sistema de aislamiento, ya que su naturaleza y su comportamiento facilitan, gracias a los análisis pertinentes, la obtención de una información muy completa. Además, es un fluido que posee una gran facilidad de regeneración.

Si lo comparamos con otros productos equivalentes como el aceite de silicona y los ésteres orgánicos, se observa que el aceite mineral tiene una mayor disponibilidad y un menor coste, de ahí su popularidad en la fabricación de transformadores.

El propósito principal de usar el aceite mineral, es impregnar el papel aislante y así evitar que exista un contacto directo entre el papel y la humedad. El aceite además, es el encargado de disipar el calor producido del transformador.

El aceite mineral se obtiene de la refinación de los hidrocarburos recogidos durante la destilación del petróleo. Luego es sometido a diversos procesos químicos para obtener las propiedades eléctricas deseadas y conferirle un alto grado de estabilidad química. [5]

3.1. Clasificación.

Los aceites aislantes se pueden dividir en dos categorías: orgánicos e inorgánicos. Dentro de los inorgánicos, son los aceites minerales los que se usan con más frecuencia para equipamientos eléctricos de potencia. Además de estos, existen en el mercado una gran variedad de aislantes líquidos sintéticos, el más común es el aceite de silicona.

Recientemente se han introducido nuevos aceites sintéticos orgánicos como los hidrocarburos de alto peso molecular y el tetracloroetileno. Estos poseen unas excelentes características dieléctricas y térmicas pero son caros.

3.1.1. Hidrocarburos clorados.

Dos hidrocarburos, el benceno y el difenilo son clorados para producir compuestos aromáticos clorados llamados askarels o simplemente policloruro de bifenilo (PCB). Estos compuestos poseen un alto punto de ignición y unas excelentes propiedades eléctricas.

Actualmente el uso de estos aislantes está prohibido debido a que tienen una alta resistencia a la degradación, se acumulan en los organismos biológicos y finalmente a través de la cadena alimentaria en el cuerpo humano, lo que plantea un gran peligro para la salud.



3.1.2. Hidrocarburos sintéticos.

Entre los aislantes líquidos, la poliolefina es el aislante elegido para cables de potencia y para algunos sistemas eléctricos. De los materiales sintéticos producidos en todo el mundo alrededor del 55% de esta producción corresponde a la poliolefina, dentro de estas, las más comunes son: el polibutileno y el hidrocarburo alquil-aromático, cuyas composiciones son más simples que la del aceite mineral pero que en general sus características son similares.

3.1.3. Aceites derivados del petróleo.

El petróleo está constituido elementalmente por carbono e hidrogeno con trazas de sulfuro oxígeno y algunos metales. Estos compuestos son tratados para conseguir las propiedades físicas, químicas y eléctricas de los aceites aislantes. A veces estos aceites son tratados con aditivos para mejorar alguna de estas propiedades.

Un aceite es considerado nafténico o parafínico si su contenido en cualquiera de ellos supera al otro. Además un aceite es considerado aromático débil si la presencia de aromáticos es menor del 5% y se considera fuertemente aromático si la presencia de aromáticos excede del 10%.

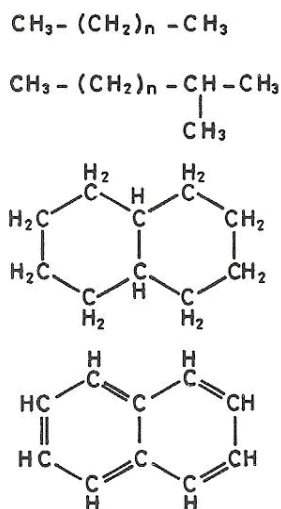


Ilustración 3: Estructura molecular de constituyentes de los aceites minerales

La primera figura representa la cadena recta de la parafina, la segunda la cadena de la parafina, la tercera corresponde a la nafténica y la última es un anillo aromático.

Básicamente, el aceite utilizado como dieléctrico proviene de un crudo de base parafínica con una concentración de hidrocarburos saturados del 90% (60% parafínicos y 30% nafténicos) y un 10% de insaturados, fundamentalmente aromáticos.

3.1.4. Aceites de silicona.

Los aceites de silicona representan una alternativa a los PCB's pero tienen el inconveniente de que son caros. Su estructura molecular principal consiste en silicona y oxígeno y grupos orgánicos constituyen la cadena lateral.

Características	IEC	ASTM
Tensión de ruptura, kV (2.mm)	40	>35
Factor de disipación eléctrica a 90°C	<0.0005	0.0003
Resistividad $\Omega \cdot m$ a 90°C	1.5×10^{12}	$>10^{10}$
Permitividad relativa a 90°C	2.2	2.2
Numero de neutralización mg KOH/g	<0.03	<0.04
Contenido en agua (ppm)	-	40

Tabla 1: Propiedades químicas y eléctricas de los polibutilenos.

El factor de disipación del aceite de silicona es independiente de la frecuencia y de la temperatura. Los aceites de silicona son resistentes a la mayoría de los productos químicos, también son resistentes a la oxidación, incluso a alta temperatura. Su alta temperatura de trabajo, comparada con los aceites minerales permite un ahorro en su producción.

La gráfica 4 nos muestra algunas propiedades importantes de los aceites minerales y de las siliconas más usadas.

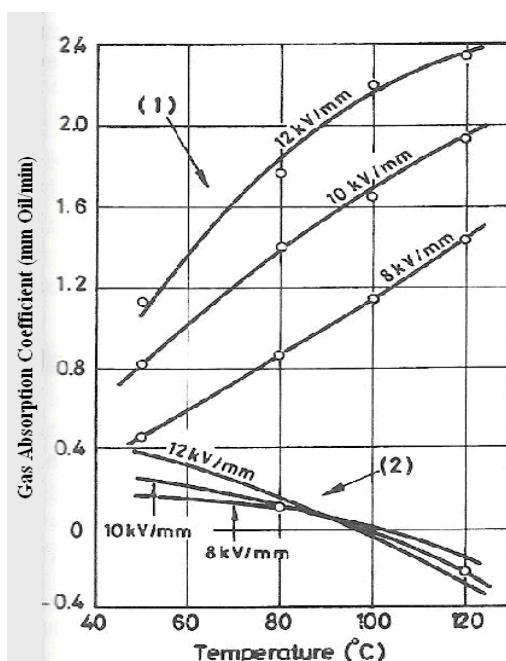


Ilustración 4: Absorción de gas de hidrógeno: (1) alquibenceno y (2) aceite mineral.

Los aceites de silicona son un sustituto aceptable para los PCB's en los transformadores a pesar de sus ligeramente inferiores propiedades.



3.1.5. Esteres.

Los esterres orgánicos tienen un alto punto de ebullición en relación con su viscosidad y además tienen un alto punto de deflagración. Tienen una buena relación entre la viscosidad y la temperatura. La permitividad de los esterres es mayor que la de los aceites minerales y de la de los aceites de silicona, pero es menos que la de los askareles. Estos materiales son muy usados en condensadores.

A continuación se muestra, en la ilustración 5, una comparativa de las propiedades más importantes para los aceites minerales y para dos clases de esterres.

PROPERTIES OF DIELECTRIC FLUIDS [1]

Properties	Units	TEST METHOD	Natural Ester A (Typical)	Natural Ester B (Typical)	Mineral oil (Spec.)
General Properties					
Specific Gravity	g/ml	ASTM D1298 @15°C	0.92	0.92	0.91
Specific heat	cal/g°C	@25°C	0.57	0.45	0.43
Thermal conductivity	W/m K	@25°C	0.17	0.17	0.14
Kinematic viscosity	cSt	ASTM D445 @0°C	300	180	76
		ASTM D445 @20°C	110	72	25
		ASTM D445 @40°C	42	34	12
		ASTM D445 @100°C	10	8	2.5
Pour point	°C	ASTM D97	-15 to -25	-21	-40
Expansion coefficient	/°C	25-100°C	0.000688	0.00074	0.00075
		25-200°C	0.000735	-	-
Flash point	°C	ASTM D92	328	326	160
Fire point	°C	ASTM D92	358	362	180
Biodegradability	%	CEC L-33-A-94 (21 days)	97-99	>99	20-30
Gassing Tendency	µL/min	ASTM D2300	-52.7	-80.5	+30 max
Corrosive Sulphur			None	None	None
Oxidation Stability (ASTM D2440) IEC 61125	% Mg KOH/g	Sludge after 72 hrs	0.01	Solid	≤0.1
		Total Acid after 72 hrs	0.1	-	≤0.3
Interfacial Tension	Dynes/cm	ASTM D971	26	24	40 min
Chemical Properties					
Neutralization value (Acidity)	mg KOH/g	ASTM D2440	0.02	0.02	≤0.015
Water Content	ppm	ASTM D1533	35	20	30
Electrical Properties					
Breakdown Strength	kV	ASTM D1816 (1mm gap)	33	36	≥20
Dielectric dissipation factor	%	ASTM D974 @25°C, 60Hz	0.0093	0.061	≤0.05
		ASTM D974@100°C, 60Hz	0.590	1.850	≤0.30
Relative Permittivity			3.2	3.2	2.2
Volume Resistivity	Ohm-cm	@25°C	10 ¹³	30x10 ¹²	10 ¹⁵
Impulse Strength	kV	ASTM D3300 Needle negative (1.2/50 µs)	134	(164-170)	≥145

Ilustración 5: Características esenciales de los esterres.



A continuación, en la tabla 2, se muestra una tabla con las características más importantes de los aceites aislantes:

Characteristic	ASTM test method	IEC publication	Typical values
Dielectric strength	D-877	156	≥ 30 kV (1.0 mm)
	D-1816		≥ 28 kV (1.02 mm)
Dissipation factor	D-924	247	0.1–0.5% (90°C)
Impulse strength	D-3300	897	145 kV
Dissolved-gas content	D-831	567	
Density, specific gravity	D-1298	296	825 ~ 890 kg/m ³
Viscosity	D-445	296-A	3 ~ 16 cSt (+40°C)
Pour point	D-97	296-A	-30°C
Neutralization number	D-974	296	≤ 0.5 mg KOH/g
Antioxidant content	D-2668	666	$\leq 0.3\%$
Water content	D-1533	733	<80 ppm
Gassing characteristic	D-2300 (AB)	628(A,B)	-35 to +35 mm ³ /min
Interfacial tension	D-971	296	40 ~ 60 mN/m
Resistivity	D-1169	247	3 ~ 10 GΩm

Tabla 2: Características de los aceites aislantes.

A efectos de diseño y funcionamiento las características de transferencia térmica, estabilidad térmica frente a estrés dieléctrico y las propiedades dieléctricas son esenciales y por eso se tratarán con más detalle a continuación

3.2.Composición interna del aceite mineral.

El rendimiento y la calidad final de los aceites lubricantes viene determinada por el tipo de petróleo, su origen y su calidad, si bien la flexibilidad de los procesos de refinado debe evitar que afecte el impacto de estos cambios.

Todos los crudos tienen una composición similar. Los hidrocarburos que componen la mayor parte del aceite están compuestos principalmente de carbono e hidrógeno, y en menor medida de un compuesto de azufre, nitrógeno, oxígeno y otros metales.

Elemento	Porcentaje
Carbono	84-87
Hidrógeno	11-14
Azufre	0-2
Nitrógeno	0,2
Oxígeno y metales	Trazas

Tabla 3: Composición general de los crudos.

Sin embargo, analizándolo más profundamente, se encuentran grandes diferencias entre unos crudos y otros que afectan a los procesos de refinado a emplear en cada caso y a las características de los productos finales.



Por tratarse del aceite usado en este proyecto, definiremos con más precisión las características de este tipo de aceites, teniendo en cuenta que no se puede valorar la cantidad exacta de hidrocarburos ya que las necesidades pueden variar dependiendo de las características que se requieren del aceite puesto que las condiciones de explotación y utilización no son siempre las mismas.

La clase y la proporción de estos hidrocarburos determinan la naturaleza química de los aceites, que pueden distribuirse en tres grandes grupos, cuyas características específicas particulares son las que se indican en los siguientes puntos:

- **Hidrocarburos parafínicos:** son hidrocarburos saturados de cadena abierta lineal ó ramificada. En su composición predominan los hidrocarburos parafínicos (o alifáticos), de fórmula general C_nH_{2n+2} . También se encuentran, en menor proporción, otros hidrocarburos de tipo aromático o nafténico.

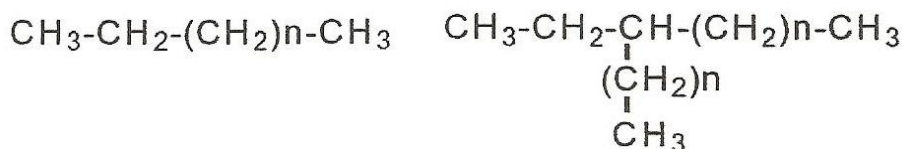


Ilustración 6: Hidrocarburos parafínicos.

Las parafinas ramificadas, que son las más interesantes, se encuentran en cantidades apreciables en las fracciones lubricantes de los crudos parafínicos. Por el contrario, las parafinas de cadena lineal y de alto peso molecular elevan la temperatura de congelación del aceite y por ello deben ser eliminadas por desparafinado.

- **Hidrocarburos nafténicos:** son hidrocarburos saturados de cadena cerrada que contienen de uno a seis anillos, los cuales pueden tener una o más cadenas laterales lineales o ramificadas. Contienen una alta proporción de hidrocarburos nafténicos, de fórmula general C_nH_{2n} .



Ilustración 7: Hidrocarburos nafténicos.

Aunque la proporción de carbonos nafténicos y parafínicos es del mismo orden, al aceite se denomina nafténico, ya que cuando ambos tipos de hidrocarburos se encuentran en proporciones similares predominan las propiedades nafténicas.

Los tipos de naftenos que contienen únicamente algunos ciclos por molécula, con predominio de átomos de carbono dispuestos en largas cadenas parafínicas, poseen probablemente las propiedades más interesantes.

- **Hidrocarburos aromáticos:** son hidrocarburos que contienen uno o más anillos aromáticos, los cuales pueden presentar cadenas laterales.

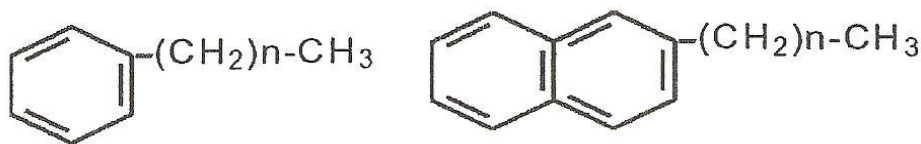


Ilustración 8: Hidrocarburos aromáticos.

Contienen una elevada proporción de hidrocarburos aromáticos, de fórmula general C_nH_{2n-x} . En general, no suelen obtenerse aceites refinados de este tipo, ya que sus características físico – químicas son muy deficientes bajo el punto de vista de su empleo como dieléctrico.

Los aceites designados comercialmente como aromáticos suelen ser, en la práctica, subproductos de las líneas de fabricación de los dos tipos de crudos anteriormente citados.

En la tabla 4 se indican algunas de las características típicas de las tres principales familias de hidrocarburos constituyentes de los aceites lubricantes:

Parafínicos	Nafténicos	Aromáticos
Baja densidad	Elevada densidad	Densidad muy alta
Punto de congelación alto	Punto de congelación bajo	Punto de congelación bajísimo
Índice de viscosidad alto	Índice de viscosidad bajo	Índice de viscosidad negativo
Volatilidad baja Alto punto de inflamación	Volatilidad superior Bajo punto de inflamación	Gran volatilidad
Carbono Conradson medio de aspecto granuloso	Carbono Conradson bajo, de aspecto pulverulento	Carbono Conradson elevado
Oxidación retardada con período de inducción	Oxidación sin período de inducción	Gran oxidabilidad
Formación de ácidos volátiles más o menos corrosivos	Menor acción corrosiva, pero formación de precipitado	Precipitación de insolubles
Sin poder disolvente frente a sustancias orgánicas procedentes de la degradación del aceite	Poder disolvente frente a los insolubles	Alto poder disolvente
Punto de anilina elevado	Punto de anilina bajo	Punto de anilina muy bajo

Tabla 4: Características típicas de las tres principales familias de hidrocarburos.



Las diferentes familias de crudos contienen proporciones variables de los diferentes tipos de hidrocarburos. A continuación se muestran unas cifras que representan las composiciones típicas de los aceites minerales que pueden obtenerse a partir de tres grandes familias de crudos.

	Aceites parafinicos	Aceites nafténicos	Aceites intermedios
% Hidrocarburos parafinicos	60 – 70	40 - 50	45 - 65
% Hidrocarburos nafténicos	20 – 30	35 - 50	25 - 40
% Hidrocarburos aromáticos	5 – 10	5 - 10	5 - 10

Tabla 5: Distribución hidrocarbonada de los distintos tipos de aceites minerales.

Actualmente, a nivel mundial, los crudos nafténicos son cada vez menos disponibles, lo que se traduce en el mercado de lubricantes en una distribución aproximada de 85/15 para la relación aceites parafinicos/ aceites nafténicos.

En España, los crudos procesados son mayoritariamente parafinicos.

Además de estos tres grandes grupos de aceites, pueden encontrarse otros, que presentan propiedades heterogéneas y que se denominan aceites intermedios, de naturaleza parafinico–aromática, parafinico–nafténica,...etc, los cuales contienen en su molécula, además de carbono e hidrógeno, átomos de azufre, nitrógeno u oxígeno.

3.3.Características.

Los aceites minerales aislantes deben presentar unas características físicas, químicas y eléctricas adecuadas que le permiten desarrollar satisfactoriamente sus funciones, para lo cual ser analizadas en servicio con una frecuencia determinada.

Estos aceites además de poseer elevada calidad dieléctrica, deben tener baja viscosidad para facilitar la formación de corrientes de convección entre las fuentes de calor y las paredes frías, y particularmente en los canales de refrigeración.

También los aceites utilizados en interruptores deben tener baja viscosidad (se trata generalmente de la misma calidad de aceite empleado en los transformadores), debido a que la extinción del arco en un fluido viscoso se produce más lentamente lo que causa la descomposición del aceite, con peligrosas formaciones de gases explosivos y de sustancias carbonosas, por otra parte se generan residuos que reducen la rigidez dieléctrica. [6]

Para obtener un funcionamiento mejor como medio que se refresca y como aislamiento eléctrico, el aceite del transformador debe tener alta fuerza dieléctrica, viscosidad baja, alta capacidad de calor y un coeficiente bajo de la extensión.



Debe también estar libre de la humedad, de los gases, de las impurezas químicas y de los contaminantes mecánicos para evitar descargas eléctricas innecesarias.

Existen diversas técnicas estandarizadas que miden los parámetros arriba enumerados, se utilizan para identificar la conveniencia del aceite para el uso como aceite del transformador.

El agua y las impurezas se extraen sometiendo el aceite a un adecuado proceso de filtrado, centrifugado y secado, pero bastan pequeñas cantidades residuales de agua (que son las más difíciles de extraer), para reducir notablemente la rigidez dieléctrica.

La selección de un fluido aislante depende de sus propiedades eléctricas y físicas además de la naturaleza del servicio que realizará. A continuación se tratarán varios aspectos importantes de los aislantes líquidos y se dará una clasificación de los mismos, con las características esenciales de los que se usan más comúnmente y de los que recientemente se han introducido.

La siguiente tabla 6 muestra las características del aceite del transformador para diferentes valores de temperatura.

Temp. (°C)	Densidad (Kg/m ³)	Calor específico J/Kg°C	Conduct. térmica W/m°C	Diferencia térmica (m ² /seg)	Viscosidad dinámica N.seg/m ²	Viscosidad cinemática (m ² /seg)	Numero Prandtl Pr
-50	922	1,7	0,116	742	29320	31800	428600
-40	916	1,68	0,116	750	3866	4220	56300
-30	910	1,65	0,115	764	1183	1300	17000
-20	904	1,62	0,114	778	365,6	404	5200
-10	898	1,6	0,113	788	108,1	120	1530
0	891	1,62	0,112	778	55,24	67,5	867
10	885	1,65	0,111	763	33,45	37,8	495
20	879	1,71	0,111	736	21,1	24	326
30	873	1,78	0,11	707	13,44	15,4	218
40	867	1,83	0,109	688	9,364	10,8	157

Tabla 6: Características del aceite de los transformadores para distintas temperaturas.

A efectos de diseño y funcionamiento las características de transferencia térmica, estabilidad térmica frente a estrés dieléctrico y las propiedades dieléctricas son esenciales y por eso se tratarán con más detalle a continuación.



3.3.1. Características térmicas.

En un sistema lleno de líquido la transferencia de calor se produce principalmente por convección.

Bajo condiciones atmosféricas normales el enfriamiento por convección sigue la siguiente fórmula:

$$N = f \left[\frac{K^3 AC}{\nu} \right]^n \quad (2)$$

donde:

- K es la conductividad.
- A es el coeficiente de expansión.
- C es el calor específico por unidad de volumen.
- N es la viscosidad cinemática.
- $n = 0.25 - 0.33$

Se ve claramente que la transferencia de calor tiene una alta dependencia con la conductividad y en menor grado con el coeficiente de expansión y C (calor específico), mientras que la viscosidad varía de forma inversa con la transferencia de calor.

3.3.2. Estabilidad térmica bajo estrés eléctrico.

En servicio, los líquidos aislantes están sometidos a estrés térmico y eléctrico en presencia de compuestos como O₂, agua, fibras y productos de descomposición de los aislantes sólidos. Estos, por ellos mismos o en combinación producen la degradación de los líquidos aislantes y la formación de sólidos disueltos y gases, que de esta forma generan corrosión y una transferencia irregular del calor, además de aumentar las pérdidas dieléctricas y las descargas parciales. En ausencia de ninguna acción correctiva, este ciclo de degradación continúa haciéndose cada vez más severo.

La degradación debida al estrés tanto térmico como eléctrico es indicativo de que o bien el diseño del equipo no fue el adecuado o existen unas malas condiciones, mientras que la oxidación constituye, en servicio, el factor de degradación más importante en los aislantes líquidos. El ratio de degradación se incrementa en presencia de materiales que actúan como catalizadores; el cobre es uno de los más activos de estos materiales.

Para retardar la oxidación, los aceites son inhibidos con aditivos llamados antioxidantes, los cuales no previenen la disolución del cobre en el aceite, pero mientras están presentes previenen la formación de radicales libres de peróxidos, especialmente de la saturación de hidrocarburos y de la posterior cadena de oxidación.

Las características como la tensión eléctrica, el impulso, la resistividad volumétrica DC, el factor de disipación dieléctrica y la permitividad relativa son por lo general de una gran importancia en los líquidos aislantes. El mantenimiento de las propiedades dieléctricas en unos niveles aceptables asegura el buen rendimiento de los equipos, reduce las pérdidas y el límite de inyección de descargas parciales.



A continuación, en la tabla 7, se muestra una tabla que da una idea de los valores límite recomendables para algunos de los ensayos de rutina.

Propiedad	Aceptable	Cuestionable	Inaceptable
Rigidez dieléctrica (kV)	>70	Entre 60 y 70	<60
Tangente de delta	$<10 \times 10^{-3}$	Entre 15 y 30×10^{-3}	$>30 \times 10^{-3}$
Tensión interfacial (Dinas/cm)	>30	Entre 26 y 30	<26
Contenido en humedad (ppm)	<10	Entre 10 y 15	>15
Acidez (mgKOH/g)	<0.05	Entre 0.05 y 0.01	>0.01
Contenido en inhibidores (%)	0,3	Entre 0.2 y 0.3	<0.2

Tabla 7: Valores límite de las características del aceite durante un ensayo de rutina.

3.4.Procesos de fabricación.

Para que las propiedades de un aceite sean las adecuadas las cuales cumplan las funciones exigidas durante el período de explotación, es necesario recurrir a procesos de refinado que eliminan o transforman aquellos compuestos cuya presencia confiere deficientes propiedades al aceite.

3.4.1. Fabricación de los aceites base.

Las funciones exigidas a los aceites minerales aplicados a los transformadores de potencia, requieren que éstos tengan unas propiedades físicas y químicas (viscosidad, punto de inflamación, etc.), que solamente poseen los hidrocarburos presentes en las fracciones más pesadas del petróleo o de alto punto de ebullición. Por ello, la materia prima para la obtención de los aceites base es el crudo reducido obtenido como fondo o residuo de la destilación atmosférica.

Los procesos industriales seguidos para la fabricación de los aceites minerales son los siguientes:

- **Destilación a vacío** del crudo reducido, para aislar y separar las diferentes fracciones brutas de aceite.
- **Desasfaltado** con disolventes, aplicado sólo al residuo de la destilación a vacío, para extraer los asfaltos.
- **Eliminación de los hidrocarburos aromáticos** a fin de mejorar las propiedades geológicas del aceite.
- **Desparafinado**, con el fin de separar los componentes sólidos (parafinas) del aceite y mejorar sus características de congelación.
- **Tratamiento de acabado**, para mejorar el color y el aspecto de los productos finales, además de algunas propiedades funcionales.

3.4.2. Aditivos del aceite mineral.

El termino aditivo es usado para nombrar aquella materia que añadida a un aceite mineral mejora o imparte alguna nueva propiedad al mismo. Los aceites nuevos no se aditivan generalmente, aunque sí es práctica habitual aditarlos justo después de su regeneración.

En el caso de los aceites minerales aplicados a transformadores, los aditivos más comúnmente utilizados se pueden clasificar, a efectos de su estudio, en los siguientes:

- Inhibidores de oxidación.
- Pasivantes.
- Desactivadores de metales.
- Anticongelantes.
- Aditivos que aumentan la resistencia a la formación de gases.
- Estabilizantes del color.

Un esquema de su modo de acción muy simplificado sería el siguiente:

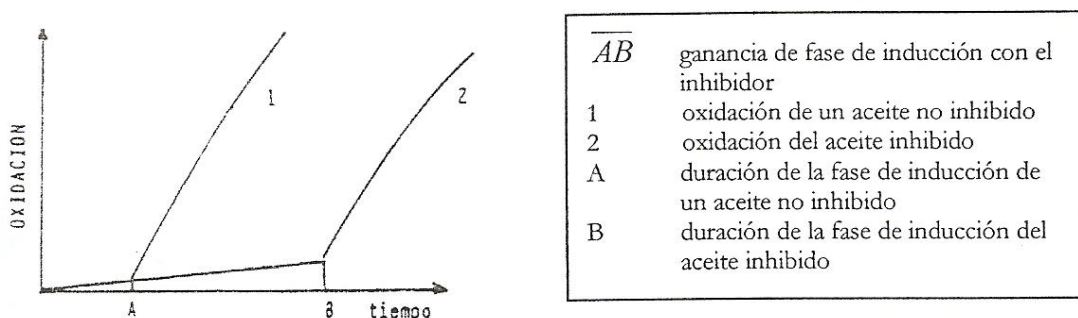


Ilustración 9: Esquema simplificado del proceso de oxidación

Los inhibidores de oxidación, también conocidos como antioxidantes, han sido los más ampliamente usados. Tal y como se deduce de su denominación, el fin que se persigue con su empleo es el de retardar el proceso de oxidación o envejecimiento de los aceites o, empleando un concepto histórico, alargar su período de inducción, que se ha considerado como aquel período de tiempo en el que el aceite absorbe muy poco oxígeno y sólo se forman muy pequeñas cantidades de productos de la oxidación, es decir, no se produce prácticamente oxidación visible.

El grado de protección asegurado por un inhibidor de oxidación es función de la composición química del aceite base y de la concentración del inhibidor. Bajo el punto de vista técnico, los aceites inhibidos tienen, como mínimo, la misma calidad que los no inhibidos, ya que, en realidad, son productos de calidad mejorada.



La clasificación de los inhibidores de oxidación puede resumirse como sigue:

- **Inhibidores** (antioxidantes): actúan con los iniciadores de la reacción en cadena formando moléculas inactivas, terminando así dicha reacción.
- **Pasivantes**: forman películas combinadas químicamente o absorbidas sobre el metal, protegen a los hidrocarburos de la acción catalítica de los metales.
- **Desactivadores**: evitan o disminuyen el efecto catalítico de los compuestos que contienen metales, solubles en los productos del petróleo, formando complejos órgano-metálicos o quelatos.
- **Retardantes o aditivos potenciales**: son sustancias inactivas que, durante la oxidación, se convierten en compuestos con propiedades similares a las de alguno de los grupos anteriores.

En cuanto a la elección del tipo de aceite, inhibido o no, ocurre lo mismo que en cualquier otro campo de la tecnología: el uso de un producto de más calidad se elige cuando las condiciones de cualquier otro tipo no son las más idóneas.

3.5.Degradación del aceite como aislante.

El aceite mineral es un compuesto de base orgánica, y como tal tiende a degradarse con el paso del tiempo, lo que afecta negativamente a sus propiedades aislantes y refrigerantes. Además, estos efectos se aceleran en presencia de distintos factores. [7]

3.5.1. Factores que deterioran el estado del aceite.

Enunciaremos los elementos principales que afectan de un modo negativo al estado del aceite:

- **Temperatura**: influye categóricamente en la degradación de aceite mineral. Por ejemplo, un aumento de 8 °C a partir de 60 °C, disminuye en un tercio la vida media del aislamiento líquido. Se considera el factor de mayor importancia.
- **Agua**: La contaminación del agua en el aceite puede estar presente en estado disuelto o informa de gotas o “nubes” como resultado de un tratamiento y mantenimiento inapropiado del aceite. Se ha reconocido que el agua es el principal enemigo para el aislamiento del transformador.

Principalmente, el efecto de esta impureza disminuye la rigidez dieléctrica del aceite; si la cantidad de agua es excesiva, también afecta a la tangente del ángulo de pérdidas (aumentando su valor) y, además, incrementa la velocidad de degradación de los aislantes.

- **Gases disueltos**: como hidrógeno, oxígeno, metano, dióxido de carbono y otros, que están presentes en los aceites nuevos como residuos del proceso de manufactura del aceite y un trato inapropiado del aceite antes de su uso.



El principal elemento que interviene en el deterioro de las propiedades del aceite mineral es el oxígeno, ya que un alto contenido acelera el envejecimiento del aceite, es decir, provoca el desencadenamiento del proceso de oxidación.

Un aceite saturado de aire puede producir burbujas y, por tanto, provocar descargas parciales en el transformador.

- **Productos iónicos y polares:** Estos contaminantes pueden estar presentes en aceites como resultado de los tratamientos de refinado de los mismos, además de la degradación del aceite, de disolventes de barnices y pinturas dentro del transformador y de la posible introducción de otro aislante contaminado.

Principalmente afectan a las propiedades eléctricas. Pueden aparecer rastros de sulfatos, sulfanatos, alcalinos, furfural, trazas de sulfuro de dióxido, y compuestos de órgano-cloro. Estas impurezas aumentan el valor de la tangente del ángulo de pérdidas como mayor perjuicio al aislante.

- **Partículas:** estos contaminantes llegan al aceite nuevo a causa del proceso de manufactura y de su transporte en los contenedores. Predominan los óxidos metálicos y metales, principalmente hierro y cobre, así como también metales disueltos como el zinc, níquel, vanadio y sodio. Estas partículas catalizan las reacciones de oxidación del aceite, aumentando así el envejecimiento. Se dan también como impurezas partículas, fibras no metálicas de la celulosa, que pueden provenir del papel del transformador o de la madera, y otras partículas de carbón.

Los aceites pueden contener entre 0.0001% y 0.001% partículas de materia mayores de 5µm de tamaño. Estas representan aproximadamente de 10^5 a 10^6 partículas por 100ml de aceite. Este tipo de impurezas reduce el valor de la rigidez dieléctrica considerablemente.

- **Estrés eléctrico:** el deterioro del aceite aumenta si es sometido a campos eléctricos intensos.
- **PCB's:** Los bifenilos policlorados eran usados en los transformadores de potencia hace años pero ahora han sido prohibidos.

Los PCB's son tratados como contaminantes no deseados ni permitidos por niveles detectables de los aceites del transformador. Esto es así porque presentan problemas de toxicidad y bioacumulación, lo que ha provocado su desaparición en el ámbito de los transformadores.

Un transformador en buen estado debe estar totalmente limpio de PCB's

**3.5.2. Envejecimiento del aceite mineral aislante.**

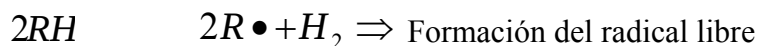
El envejecimiento de un aceite mineral es el compendio de todos los procesos físicos y químicos que, durante el desarrollo de las funciones aislantes y refrigerantes del mismo en el seno del transformador, conducen a modificaciones significativas de las propiedades iniciales de dicho aceite.

En última instancia, prácticamente todas estas modificaciones son el resultado de un proceso de oxidación que experimenta el aceite a lo largo de los años de servicio.

a) Proceso de oxidación

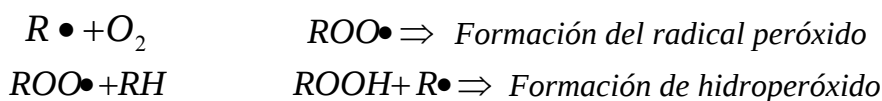
Los hidrocarburos son las moléculas que constituyen la estructura química de los aceites. Estas moléculas son susceptibles de reaccionar con el oxígeno a través de un mecanismo en cadena de radicales libres conocido como autooxidación, que comprende las siguientes etapas:

- *Iniciación:* se produce por descomposición de los hidrocarburos por efecto de la temperatura, de la luz o por catálisis metálica. Debido a esto, se forma un radical libre a partir de las moléculas de hidrocarburo:

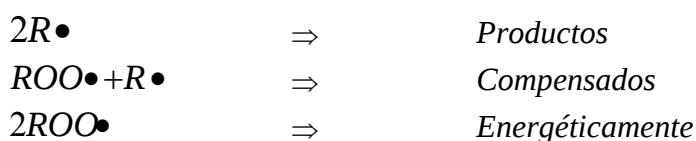


La formación de radicales peróxido es el paso principal donde se consume oxígeno, a partir del cual, por reagrupar intramolecular o por posterior reacción, se forman todos los productos de oxidación.

- *Propagación:* cuando el producto procedente de un radical simple reacciona para formar dos radicales, se produce la ramificación en cadena y la velocidad de reacción aumenta. Como los hidroperóxidos no sólo son indicadores sino también productos, la mayor parte de las autooxidaciones son autocatalizadas.



- *Ramificación:* $ROOH \quad RO\bullet + \bullet OH$
- *Terminación:* esta etapa implica el acoplamiento de radicales alquilperóxido y de radicales alquílicos, bien sea entre sí o con otros radicales, produciendo moléculas no activas desde el punto de vista de la oxidación, decreciendo, por tanto, el número de radicales libres. La terminación, por tanto disminuye o para la reacción.





b) Productos formados durante el proceso de oxidación

Los hidroperóxidos, formados en las primeras etapas de la oxidación, pueden evolucionar por varios caminos reactivos distintos para formar especies químicas más estables. Las principales especies formadas y los problemas que plantean son:

- *Ácidos carboxílicos*: proporcionan el aceite un grado de corrosividad que depende de la naturaleza de los ácidos formados. Causan daños en los elementos sumergidos en el aceite. Fundamentalmente, disminuyen la resistencia mecánica de los aislamientos celulósicos.
- *Agua*: acelera la corrosión de los metales y de los materiales aislantes presentes. Además, degrada seriamente las propiedades dieléctricas del aceite y de los otros aislantes del transformador debido a su alta polaridad.
- *Sales* (esteres y sales metálicas de ácidos orgánicos): afectan seriamente a las propiedades dieléctricas del aceite y de los aislantes impregnados de aceite, incrementando la tendencia a formar emulsiones.

La presencia de ciertas sales metálicas, de limitada solubilidad, provocan la oclusión de los conductos de refrigeración y el recubrimiento de las superficies metálicas de intercambio térmico de los transformadores, lo que impide en gran medida la disipación de calor.

- *Gases*: provocan descargas parciales y ruptura dieléctrica si se concentran en las áreas de mayor sollicitación eléctrica del transformador. Fundamentalmente son hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos de uno a tres átomos de carbono.
- *Lodos*: son los últimos productos de la oxidación y son insolubles. Se depositan sobre las partes más calientes de núcleo y de los arrollamientos. Se depositan, principalmente, alrededor de los conductos de aceite de los radiadores. Disminuye el rendimiento de los equipos de refrigeración y aumenta considerablemente el valor de la tangente del ángulo de pérdidas.
- *Otros compuestos con oxígeno*: la evolución de los hidroperóxidos puede formar compuestos carbonílicos como cetonas y lactonas. Al ser todos ellos moléculas polares, reducen la rigidez dieléctrica.

Así mismo, los compuestos presentes en el aceite tales como hidrocarburos aromáticos y compuestos con azufre se oxidan produciendo fundamentalmente quinonas y sulfóxidos [8]



4. ESPECTROSCOPIA DIELECTRICA.

Un estudio de espectroscopia dieléctrica trata de obtener la respuesta de los materiales cuando se les aplica un campo eléctrico variable con el tiempo. Esta respuesta se expresa en términos de una magnitud macroscópica, la permitividad dieléctrica (ϵ), de cuyo análisis en función de la temperatura y frecuencia se obtiene información acerca de magnitudes microscópicas.

En este capítulo se describen los fundamentos de la espectroscopia dieléctrica, introduciendo las teorías de la respuesta dieléctrica universal para explicar el origen de las contribuciones a la permitividad estática y dinámica. Así mismo, se detallan las funciones empíricas propuestas por Debye para explicar la relajación dieléctrica.

4.1. Respuesta dieléctrica.

La polarización total de un medio dieléctrico depende de la frecuencia del campo aplicado, debido a los diferentes tiempos característicos de los mecanismos de polarización. Este fenómeno es de carácter general, de manera que ante un cambio repentino de valor del campo eléctrico aplicado, el material necesita un tiempo de respuesta, que depende de las características del proceso de polarización, para alcanzar una nueva situación estacionaria.

Cuando a un dieléctrico se le aplica un campo eléctrico aparece una densidad de corriente $\vec{J}$ que es la suma de las densidades de corriente de conducción de portadores libres, $\vec{J}_c$ y de desplazamiento $\vec{J}_d$. La primera, está dada por:

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (3)$$

Donde:

σ es la conductividad del material.

Esta ecuación donde σ es independiente del campo, válida para campos bajos, de manera que el desplazamiento de los portadores de carga bajo la acción del campo es casi instantáneo. En la mayor parte de los materiales dieléctricos, esta contribución es varios órdenes de magnitud inferior que en un metal o en un semiconductor. La densidad de corriente de desplazamiento viene dada por:

$$\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4)$$

La corriente de desplazamiento está presente aunque no haya ningún material entre los electrodos, esto es debido a que esta densidad de corriente no se debe a un desplazamiento de carga real a través del material y se manifiesta como la variación de carga inducida en los electrodos del circuito externo de medida. [9]



Dada la definición del vector desplazamiento o densidad de flujo eléctrico $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$, vemos que:

$$\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \quad (5)$$

El primer sumando representa la corriente de desplazamiento en el vacío, mientras que el segundo contiene la respuesta eléctrica del material, la cual depende de los mecanismos de polarización activados por el campo eléctrico aplicado.

El estudio de la respuesta de los dieléctricos en campos variables con el tiempo tiene gran interés. Existen dos métodos para estudiar y caracterizar la respuesta dieléctrica de un material:

- Respuesta en el dominio de tiempos: Se somete al material a una variación súbita del campo aplicado (función escalón) y se estudia la evolución de $\vec{J}_d$ en el tiempo.
- Respuesta en el dominio de frecuencias. Se somete al material a un campo sinusoidal de frecuencia constante durante un tiempo suficientemente largo y se estudia $\vec{J}_d$ en función de la frecuencia aplicada.

4.1.1. Función de la respuesta dieléctrica.

Supongamos un dieléctrico lineal (en el que $\vec{E}$ y $\vec{D}$ son proporcionales, $\vec{D}(t) = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}(t)$). Admitiendo el principio de superposición, por el que la respuesta de un dieléctrico ante excitaciones consecutivas es igual a la suma de las respuestas a las excitaciones individuales, tenemos que el valor de $\vec{D}(t)$ que resulta de aplicar un campo eléctrico $\vec{E}(t)$ en forma de pulso rectangular de altura E_0 y duración infinitesimal, que se inicia en el instante $t = \theta$, es:

$$\vec{D}(t) = \epsilon_0 \epsilon_\infty \vec{E} + \epsilon_0 (\epsilon_a - \epsilon_\infty) \vec{E}_0 f(t - \theta) \quad (6)$$

En esta expresión el primer término representa la respuesta instantánea del dieléctrico, mientras que el segundo da cuenta de la polarización retardada. La función $f(t)$ es la que contiene la información acerca de la respuesta del dieléctrico y se denomina función respuesta del dieléctrico.

Cualquier campo $\vec{E}(t)$ aplicado se puede descomponer en una suma de infinitos pulsos rectangulares de anchura infinitesimal, de manera que el desplazamiento en un instante dado vendrá dado por la superposición de todas las contribuciones previas de los pulsos rectangulares:

$$\vec{D}(t) = \epsilon_0 \epsilon_\infty \vec{E} + \epsilon_0 (\epsilon_a - \epsilon_\infty) \int_{-\infty}^t \vec{E}(\theta) f(t - \theta) d\theta \quad (7)$$

Este resultado se expresa de forma general cómo se puede calcular la respuesta del dieléctrico, $\vec{D}(t)$, ante un campo eléctrico variable en el tiempo, $\vec{E}(t)$.

El cambio $u = t - \theta$ en la ecuación anterior hace que la integral del segundo sumando represente el producto de convolución entre $f(t)$ y $\vec{E}(t)$.

$$\vec{D}(t) = \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E} + \varepsilon_0 (\varepsilon_a - \varepsilon_\infty) \int_{-\infty}^t \vec{E}(t-u) f(u) du \quad (8)$$

Aplicando la transformación de Fourier a la ecuación anterior, obtenemos:

$$\vec{D}(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E}(\omega) + \varepsilon_0 (\varepsilon_a - \varepsilon_\infty) \vec{E}(\omega) F(\omega) \quad (9)$$

Donde:

$\vec{D}(\omega)$ es la transformada de Fourier del desplazamiento.

$\vec{E}(\omega)$ es la transformada de Fourier del campo.

$F(\omega)$ es la transformada de la función respuesta.

La última ecuación expresa que cada componente de Fourier $\vec{E}(\omega)$ del campo aplicado origina su propia respuesta $\vec{D}(\omega)$ a través de la función respuesta $F(\omega)$ con independencia de los demás componentes. [10]

4.1.2. Respuesta dieléctrica en el dominio del tiempo.

En la disposición de un electrodo aislado-vacío, el vector de dislocación eléctrica (o “densidad dieléctrica del flujo” o “inducción eléctrica”) es exactamente proporcional al vector de campo E, están relacionados de la siguiente forma:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (10)$$

Si el campo es variable con el tiempo el vector de inducción eléctrica se expresa de la siguiente forma:

$$\vec{D}(t) = \varepsilon_0 \vec{E}(t) \quad (11)$$

Donde:

ε_0 es la constante dieléctrica del vacío.

El origen de D y E normalmente proviene de la fuente de tensión que conectamos entre los electrodos que están bajo consideración.

Si las escalas de tiempo consideradas todavía producen las condiciones electrostáticas de campo, no existirá ningún retraso entre ambas magnitudes. Hay que denotar, sin embargo, que D representa las cargas tanto positivas como negativas inducidas por unidad de área en la superficie de los electrodos, y que a su vez estas cargas son el origen de fuentes y sumideros de todas las líneas de campo eléctrico.



Para campos variables en el tiempo $E(t)$, la “corriente de dislocación” la debe dar la fuente de tensión para que se mantenga la densidad de carga en el área de los electrodos. Esta corriente viene dada por la siguiente relación:

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (12)$$

Donde Q es la carga eléctrica total depositada en cada uno de los electrodos.

Si ahora, sustituimos el vacío por un material isotrópico, la dislocación eléctrica D , aumenta su polarización macroscópica inherente P según lo definido en la siguiente ecuación:

$$\vec{D}(t) = \varepsilon_0 \vec{E}(t) + \vec{P}(t) = \varepsilon_0 (1 + \chi) \vec{E}(t) \quad (13)$$

De la ecuación 13 cabe destacar, que separa las dos clases de inducción de carga (como ambos vectores, P y D , están todavía en paralelo con E para materiales isotrópicos). Es también importante el hecho de que la dependencia de $P(t)$ con el tiempo no sea la misma que la que tiene el campo eléctrico. Esto es así debido al retraso que tienen los diversos procesos de polarización con respecto de E .

Este retraso es causado obviamente por el comportamiento dependiente del tiempo que tiene la susceptibilidad del material. Este retraso, si bien, se puede entender de la siguiente manera.

Asumamos que empezamos a aplicar el campo eléctrico de magnitud E_0 en el instante t_0 y que el campo eléctrico aplicado al dieléctrico sigue siendo constante para un tiempo t .

El dieléctrico se puede entonces caracterizar por su susceptibilidad dependiente del tiempo $\chi(t)$ así como por su polarización específica $P(t)$ como respuesta en el dominio del tiempo, es decir la formación y la evolución de las diversas clases de procesos de polarización, los cuales pueden darse en intervalo extremadamente cortos (como la polarización electrónica), en intervalos de duración más larga (como en la polarización iónica) o aún mucho más larga (como en la polarización orientacional). [11]

Para $t=0$ la susceptibilidad o la polarización son cero.

En el cuadro que se muestra a continuación están representados los procesos de polarización en el dominio del tiempo, que también se pueden representar siguiendo la siguiente expresión:

$$\frac{P(t)}{E_0} = \varepsilon_0 \chi(t) 1(t) \quad (14)$$

El factor $1(t)$ se utiliza para el valor de E_0 en el cuadro, la primera parte se simplifica de forma ideal (como un escalón) para explicar la rapidez de los procesos de polarización, una “polarización instantánea” $P(t=t_0)=P$, el cual no solo incluye la polarización electrónica, sino también otros procesos rápidos de polarización.

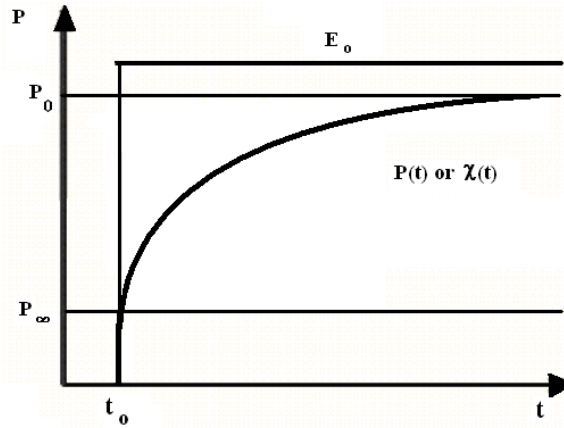


Ilustración 10: Respuesta de la polarización frente a un escalón de tensión E_0 en $t=t_0$.

Según la gráfica la respuesta de esta polarización se puede escribir como:

$$P(t) = P_{\infty} + (P_s - P_{\infty})g(t - t_0) \quad (15)$$

o, de la siguiente forma si se introduce la constante dieléctrica relativa.

$$P(t) = \varepsilon_0 [\chi_{\infty} + (\chi_s - \chi_{\infty})g(t - t_0)]E_0 \quad (16)$$

$$P(t) = \varepsilon_0 [\varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})g(t - t_0)]E_0 \quad (17)$$

Con los conocimientos de teoría general de circuitos, ahora es posible calcular cualquier otra polarización dependiente del tiempo $P(t)$ para cualquier otro tipo de excitación dependiente del tiempo $E(t)$, de un objeto sometido a prueba, puesto que se conocen las soluciones especiales para la excitación en forma de un escalón de tensión.

Esto puede hacerse mediante la “integral de Duhamel” o la convolución en el dominio del tiempo:

$$P(t) = \varepsilon_0 \chi_{\infty} E(t) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t f(t - \tau) E(\tau) d\tau \quad (18)$$

donde la función el $f(t)$ representa la respuesta dieléctrica.

$$f(t) = (\chi_s - \chi_{\infty}) \frac{\partial g(t)}{\partial t} = (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \frac{\partial g(t)}{\partial t}. \quad (19)$$

La función de la respuesta dieléctrica es obviamente una función monótona que disminuye y que es inherente al dieléctrico investigado.

La polarización $P(t)$ produce la principal parte de la corriente de polarización (o absorción, o de carga) en un objeto de la prueba si el campo eléctrico, $E(t)$, se aplica repentinamente. [12]

Según lo postulado ya por Maxwell en 1891, el campo $E(t)$ genera una densidad de corriente $j(t)$, que puede ser calculada como suma de la conducción, corrientes de dislocación del vacío y de la polarización, es decir:

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 \frac{\partial E(t)}{\partial t} + \frac{\partial P(t)}{\partial t} \quad (20)$$



y con la ecuación 20 para $E(t)=\text{constante}$ tendremos la siguiente expresión:

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 [\varepsilon_\infty \delta(t) + f(t)] E(t) \quad (21)$$

Donde:

$$\varepsilon_\infty = 1 + \chi_\infty \quad (22)$$

La ecuación 21 y la siguiente ecuación son una primera base para la medida de la $f(t)$ función de la respuesta dieléctrica o para caracterizar los materiales dieléctricos con el método del tiempo-dominio (TD).

Se aplica entonces un escalón de tensión de valor U_c al objeto de prueba que se ha descargado previamente cuidadosamente.

Luego, la corriente de polarización a través de dieléctrico se define de la siguiente forma:

$$i_{pol}(t) = C_0 U_c \left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t) \right] \quad (23)$$

Donde:

C_0 es la capacitancia geométrica del objeto de la prueba.

$\delta(t)$ es la función que representa el escalón de tensión que se aplica en $t = t_0$.

La corriente de polarización contiene tres términos: el primero se relaciona con la conductividad intrínseca del objeto de prueba y es independiente de cualquier proceso de polarización, el último representa todos los procesos de la polarización que ocurren al activar el escalón de tensión y la parte media está relacionado con la función $\delta(t)$ (función escalón) que no puede ser en la práctica registrada, debido a la gran gama de amplitudes actuales inherentes con los procesos rápidos de polarización.

Generalmente se puede detener la medida de la corriente de polarización, si la corriente se vuelve muy alta debido al término dc o si llega a ser muy baja.

Si el objeto de la prueba es ahora un cortocircuito en $t=t_c$, la corriente de despolarización i_{depol} se puede medir, y está representada en la siguiente ecuación numero 24.

$$i_{depol} = -C_0 U_o [f(t) - f(t + T_c)] \quad (24)$$

Donde:

T_c es la duración del escalón de tensión.

Esta corriente es de sentido contrario, al de la corriente de polarización.

El segundo término de esta ecuación puede ser despreciado solamente si el período de carga T_c es lo suficientemente largo para que permita terminar todos los procesos de polarización.

La corriente de despolarización entonces llega a ser directamente proporcional a $f(t)$ función de la respuesta dieléctrica, puesto que la conductividad de σ_0 del dieléctrico no está implicada, y se puede calcular fácilmente, a partir de la diferencia entre las corrientes de polarización y de despolarización. [13]

La ecuación (19) es así una segunda base para la medida de $f(t)$ la función de la respuesta dieléctrica o para caracterizar los materiales dieléctricos en el dominio del tiempo (TD). Hay que destacar, sin embargo, que en los períodos de carga escasos T_c no harán que el segundo término de la ecuación se haga cero, es decir hay un "efecto de la memoria" en el dieléctrico debido a los fenómenos de la polarización que no han concluido debido al período de carga insuficiente T_c . (este efecto se demuestra más adelante en el cuadro 5).

En la ilustración 11, los picos con forma de aleta de tiburón agudos se asociaron a las funciones $\delta(t)$ (función escalón). En la práctica, la polarización y las corrientes de despolarización se miden convenientemente con "una técnica de dos electrodos" según lo ilustrado en el cuadro 3. Las dos resistencias de este circuito representan pequeñas resistencias de la protección, que no influenciarán las corrientes registradas.

Si el objeto de la prueba contiene un sistema del aislamiento, que se puede subdividir en diversos subsistemas, las corrientes de polarización y de despolarización se pueden entonces definir mediante la selección del electrodo conveniente y poder así detectar convenientemente en el potencial de tierra virtual.

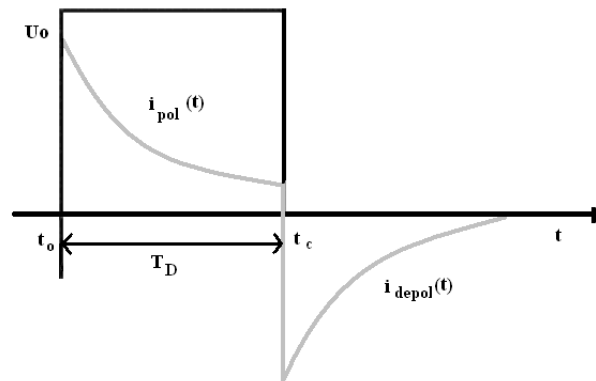


Ilustración 11: Principio de medida de la corriente de polarización y despolarización.

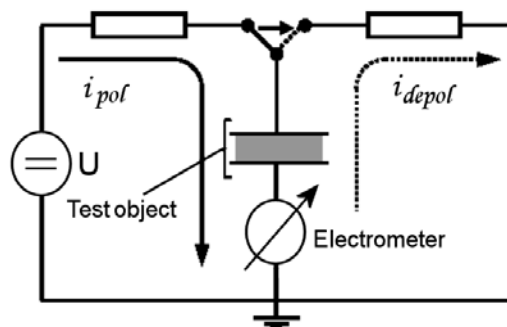


Ilustración 12: Esquema de la técnica de medida del PDC.



4.1.3. Respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia.

La respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia (FDS) es una transición analítica a partir de la respuesta dieléctrica en el dominio del tiempo.

Esto se puede conseguir fácilmente utilizando la transformada de Fourier o de Laplace, a partir de estas, obtenemos las ecuaciones que pasamos a exponer a continuación.

La respuesta dieléctrica de la densidad de corriente frente a un escalón de tensión ideal, considerando también los procesos instantáneos de polarización se asume como:

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 \frac{dE(t)}{dt} + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) E(\tau) d\tau \quad (25)$$

con:

$$j(t) \Rightarrow j(p); E(t) \Rightarrow E(p); E'(t) \Rightarrow pE(p); f(t) \Rightarrow F(p) \quad (26)$$

y considerando la convolución de los últimos términos en esta ecuación obtenemos la siguiente relación, siendo “p” el operador de Laplace:

$$j(p) = \sigma_0 E(p) + \varepsilon_0 pE(p) + \varepsilon_0 pF(p)E(p) \quad (27)$$

Como p es una frecuencia compleja $i\omega$, nosotros podemos reducir la ecuación de la siguiente forma:

$$\bar{j}(\omega) = \bar{E}(\omega) [\sigma_0 + i\omega\varepsilon_0 (1 + \bar{F}(\omega))] \quad (28)$$

Así $F(\omega)$ es la transformada de Fourier de la $f(t)$ función de la respuesta dieléctrica o de la susceptibilidad compleja:

$$\bar{\chi}(\omega) = \bar{F}(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega) = \int_0^\infty f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (29)$$

Demostramos que la densidad de corriente total es:

$$\bar{j}(\omega) = \{\sigma_0 + \varepsilon_0 \omega \chi''(\omega) + i\omega\varepsilon_0 [1 + \chi'(\omega)]\} \bar{E}(\omega) \quad (30)$$

La parte principal de esta densidad de corriente tiene su origen en la dislocación eléctrica compleja D_0 la cuál es proporcional a la constante dieléctrica compleja, con la relación:

$$\bar{D}(\omega, t) = \varepsilon_0 \varepsilon^*(\omega) \bar{E}(\omega, t) \quad (31)$$

$$\text{Donde: } \varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = (1 + \chi'(\omega)) - i\chi''(\omega) \quad (32)$$

Es difícil realizar la respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia, si la gama de frecuencia llega a ser muy grande. Generalmente y por lo menos en la ingeniería de la energía eléctrica, se suele hacer una sola medida de $C\text{-tg}\delta$ a la frecuencia industrial.

Los sofisticados instrumentos del laboratorio pueden cubrir, sin embargo, muchas décadas en la frecuencia. Hay que tener en cuenta que, según la ecuación número 32, tales instrumentos no pueden distinguir entre la contribución a la corriente de la conductividad "pura" de σ y las pérdidas dieléctrica $\chi''(\omega)$. Esto significa que la medida de la permitividad relativa del dieléctrico $\epsilon^*(\omega)$ es diferente de la permitividad relativa $\epsilon^*(\omega)$.

Por lo tanto la medida de la permitividad relativa del dieléctrico se define mediante la siguiente relación

$$\vec{j}(\omega) = i\omega\epsilon_0\epsilon_r^*(\omega)\vec{E}(\omega) \quad (33)$$

En el caso de ampliar un campo eléctrico alterno de frecuencia ω , dada por $\vec{E}(t) = \vec{E}_0 e^{j\omega t}$, el desplazamiento eléctrico está dada por:

$$\vec{D}(t) = \epsilon_0\epsilon_\infty\vec{E} + \epsilon_0(\epsilon_a - \epsilon_\infty) \int_0^\infty \vec{E}(t-u) f(u) du \quad (34)$$

donde se obtiene:

$$\vec{D}(t) = \left[\epsilon_0\epsilon_\infty\vec{E} + \epsilon_0(\epsilon_a - \epsilon_\infty) \int_{-\infty}^t f(u) e^{-j\omega u} f(u) du \right] \vec{E}_0 e^{j\omega t} \quad (35)$$

El factor entre paréntesis en la ecuación anterior es un número complejo que expresa la proporcionalidad entre el campo eléctrico y el desplazamiento en dieléctricos lineales. De forma general, esta relación se puede expresar:

$$\vec{D}(\omega, t) = \epsilon_0\epsilon^*(\omega)\vec{E}(\omega, t) \quad (36)$$

De estas ecuaciones podemos obtener el valor de la permitividad relativa compleja a la frecuencia ω .

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) \quad (37)$$

el cual viene dado por:

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_\infty + (\epsilon_a - \epsilon_\infty) \int_0^\infty f(u) e^{-j\omega u} du \quad (38)$$

Finalmente las partes real e imaginaria de la permitividad compleja son:

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + (\epsilon_a - \epsilon_\infty) \int_0^\infty f(u) \cos(\omega u) du \quad (39)$$

$$\epsilon'' = (\epsilon_a - \epsilon_\infty) \int_0^\infty f(u) \sin(\omega u) du \quad (40)$$

La parte real de la permitividad representa la capacidad de un objeto de la prueba, mientras que la parte imaginaria representa las pérdidas.

Ambas cantidades dependen de la frecuencia. Muchas veces este factor no se aprecia si hacemos una sola medida para una sola frecuencia de "C-tg δ ", ya que los efectos que hacen que el dieléctrico se envejezca harán que cambien estas cantidades en una gama muy diversa de frecuencias.

En la ecuación 38 se muestra la relación existente entre el tiempo y los dominios de la frecuencia. Como se puede observar la susceptibilidad compleja χ^* , y sus partes real e imaginaria se pueden transformar en la función de la respuesta dieléctrica $f(t)$ y viceversa.

Ambos dominios extienden desde cero a infinito, pero en la práctica para cada conversión, sólo estarán disponibles los resultados de la medida.

Finalmente, debe ser observado que todas las cantidades dieléctricas son más o menos dependientes con la temperatura. Cualquier comparación o medida de estas cantidades debe tomar esto en cuenta.

Realizando medidas del dominio de la frecuencia (FDS) los resultados típicos de las medidas del FDS se demuestran en las siguientes ilustraciones 13 y 14:

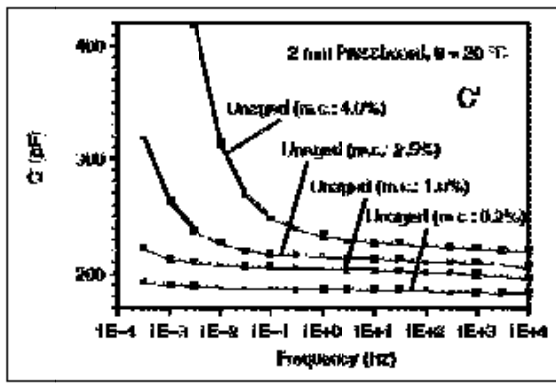


Ilustración 13: Parte real de la capacidad.

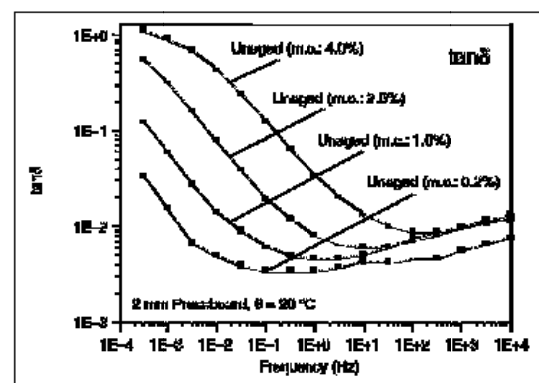


Ilustración 14: Tangente de pérdidas

Estas ecuaciones reflejan un hecho fundamental en el comportamiento de los dieléctricos bajo la acción de campos alternos sinusoidales: el desfase que aparece entre el campo eléctrico aplicado y la respuesta del dieléctrico expresada por el desplazamiento. Este desfase es consecuencia del retraso de la polarización respecto del campo aplicado.

4.2. Pérdidas dieléctricas.

La corriente de desplazamiento en un campo alterno sinusoidal estacionario es:

$$\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [\epsilon_0 \epsilon^*(\omega) \vec{E}_0 e^{j\omega t}] = j\omega \epsilon_0 \epsilon^*(\omega) \vec{E}_0 e^{j\omega t}$$

Así por analogía formal con la ley de Ohm, se puede definir una conductividad compleja $\sigma^*(\omega) = j\omega \epsilon_0 \epsilon^*(\omega)$. En el caso general de que exista además conducción por portadores libres en el medio (expresada mediante una conductividad σ_c), las partes real e imaginaria de la conductividad vendrán dadas por:

$$\begin{aligned} \sigma' &= \sigma_c + \omega \epsilon_0 \epsilon''(\omega) \\ \sigma'' &= \omega \epsilon_0 \epsilon'(\omega) \end{aligned} \quad (42)$$

El valor de la conductividad compleja en un medio de conducción por portadores libres, determinada a partir de la permitividad compleja tiene la siguiente forma:

$$\varepsilon^* = \frac{\sigma^*}{j\omega\varepsilon_0} = \varepsilon'(\omega) - j \frac{\sigma'(\omega)}{\omega\varepsilon_0} \quad (43)$$

es decir que la parte compleja de la permitividad se halla incrementada en la cantidad $\sigma_c / \varepsilon_0 \omega$. Por ello, al interpretar las curvas experimentales de la constante dieléctrica con la frecuencia, hay que tener en cuenta el papel dominante de la conductividad del material a bajas frecuencias.

De la discusión anterior también se deduce que hay cierto desfase entre la corriente de desplazamiento y el campo alterno aplicado, tal como se ve en el siguiente diagrama. La componente de la densidad de corriente de desplazamiento en fase con el campo aplicado hace que exista en el medio cierta pérdida de energía por efecto Joule.

La potencia media disipada por unidad de volumen es:

$$W = \frac{\omega\varepsilon_0\varepsilon''E_0^2}{2} \quad (44)$$

La potencia media disipada es proporcional a la parte imaginaria de la permitividad relativa, por lo que a ésta se le denomina factor de pérdidas.

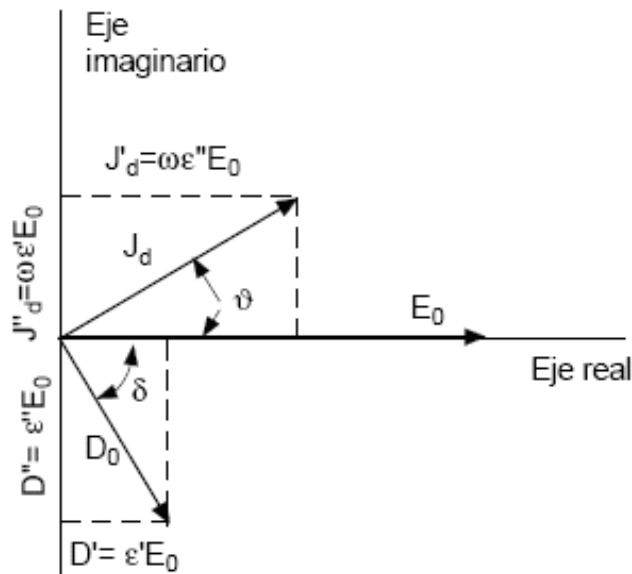


Ilustración 15: Vectores E, D y J_d en un dieléctrico sometido a un campo sinusoidal.

De las relaciones entre ellos dadas en el texto se deduce $\delta + \theta = \pi/2$.

Según se ve en la ecuación de la conductividad real e imaginaria el término $\omega\varepsilon_0\varepsilon''(\omega)$ no es más que la parte real de la conductividad compleja en un medio sin conductividad por portadores libres.

Por razones de carácter experimental, para caracterizar las pérdidas dieléctricas se suele utilizar la tangente del ángulo de desfase, δ , entre el campo aplicado y el desplazamiento. En el diagrama se ve que la tangente del ángulo de pérdidas está dada por:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (45)$$

Si el ángulo de pérdidas es pequeño, es seno del mismo se puede aproximar por la tangente, de manera que la potencia disipada por unidad de volumen se puede expresar como:

$$W = \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon'' E_0^2}{2} = \frac{\omega \varepsilon_0 D_0 E_0}{2} \left(\frac{\varepsilon'' E_0}{D_0} \right) = \frac{\omega \varepsilon_0 D_0 E_0}{2} \operatorname{sen} \delta \approx \frac{\omega \varepsilon_0 D_0 E_0}{2} \operatorname{tg} \delta \quad (46)$$

Según se deduce del diagrama, el factor entre paréntesis no es más que el seno del ángulo de pérdidas. De manera que, para ángulos de pérdidas pequeños, las pérdidas del medio son proporcionales a la tangente del ángulo de pérdidas.

4.3. Permitividad dieléctrica.

El análisis eléctrico dinámico juega un papel importante en la ciencia de los materiales y en la electroquímica. Este estudio consiste en el análisis de la parte real e imaginaria de la permitividad del material en función de la frecuencia a temperatura constante.

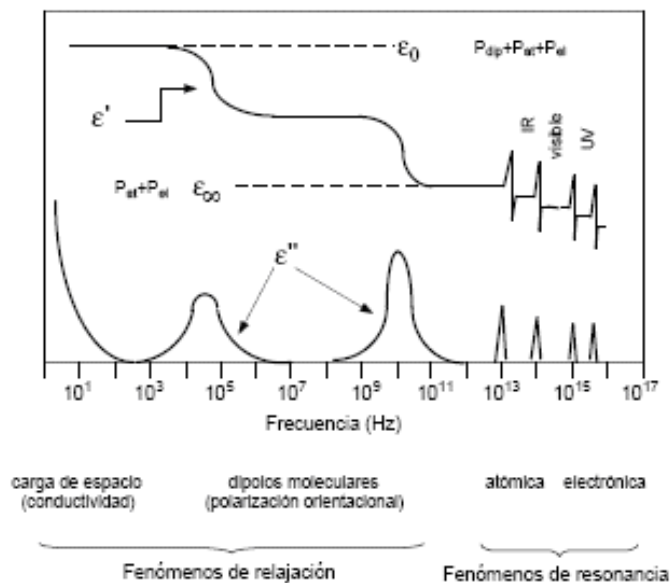


Ilustración 16: Curvas de dispersión ($\varepsilon'(\omega)$) y de los picos de absorción ($\varepsilon''(\omega)$)

Como se puede ver en la ilustración 16, la curva de dispersión de la constante dieléctrica en la región de frecuencias donde tiene lugar la polarización orientacional tiene una forma diferente a la que se da en la zona de frecuencias donde tiene lugar la polarización iónica y electrónica. Esto es debido a que estos mecanismos son muy diferentes al de orientación molecular.



La espectroscopía de relajación dieléctrica se aplica también en muchas investigaciones como en el estudio de las estructuras moleculares y supramoleculares de los polímeros, y en particular, de los mecanismos de movimiento de las mismas.

El campo eléctrico alterno que se aplica al material afecta directamente a los dipolos moleculares y provoca el movimiento de segmentos moleculares y grupos laterales.

El comportamiento dinámico de la polarización orientacional obedece a un proceso de reorientación, también llamado de relajación. Por el contrario los procesos de polarización iónica y electrónica se deben a un proceso de resonancia, en los cuales los iones y los electrones absorben energía cuando la frecuencia del campo entra en resonancia con la vibración de las cargas. [14]

En los procesos de relajación los picos son mucho más anchos que en los de resonancias, ya que estos últimos se deben a transiciones iónicas y electrónicas entre los niveles discretos de energía.

Las ondas electromagnéticas con una frecuencia superior a 10⁹ Hz no excitan ninguna transición electrónica, de manera que no excitan ningún proceso de polarización. A frecuencias algo menores pueden excitar los electrones más internos produciéndose algún tipo de absorción:

- Por debajo de las frecuencias de resonancia de los electrones internos, estos contribuyen a la polarización resultando un valor de la constante dieléctrica algo superior a la unidad.
- En el rango de frecuencias entre el infrarrojo y el ultravioleta, se producen numerosos picos de absorción debidos a las transiciones electrónicas entre los niveles discretos moleculares o de las bandas en los sólidos. Para frecuencias inferiores a este intervalo, todos los electrones contribuyen a la polarización, mediante el proceso de polarización electrónica.
- A frecuencias más bajas aparecen fenómenos de resonancia ligados a las vibraciones de los átomos e iones en moléculas y sólidos.
- A frecuencias por debajo de las de resonancia iónica, los iones pueden seguir las oscilaciones del campo externo, apareciendo la polarización iónica, la cual tiene su propia contribución al a constante dieléctrica.

La contribución de los dipolos permanentes se presenta a frecuencias aún más bajas, en los intervalos correspondientes a las microondas y la radiofrecuencia. A frecuencias inferiores aparece la contribución de la polarización orientacional.

Finalmente se observan procesos de relajación asociados a fenómenos interfaciales y a la conductividad del material. Los primeros tienen frecuencias características muy bajas, de algunos Hz.



4.4. Usos de la espectroscopía dieléctrica.

Si el sistema de aislamiento no está formado por un solo material dieléctrico, sino que lo que encuentra entre los dos electrodos de prueba es un sistema formado por varios dieléctricos, a menudo se toma la presunción de que los resultados de las medidas de la respuesta dieléctrica son independientes de la geometría y la composición del sistema de aislamiento.

Un ejemplo típico de esto es el sistema del aislamiento de los transformadores de potencia, que se componen de espacios llenos de aceite y de barreras de cartón prensado que se estructuran de diferente forma, según el fabricante.

Todos los fabricantes de transformadores están bien enterados de que los resultados de las medidas de $C\text{-tan}\delta$ para la frecuencia industrial son dependientes no solo de la construcción del sistema de aislamiento, sino también de la calidad de los materiales que forman este sistema y de la calidad del proceso de impregnación del cartón en aceite y de la reducción del contenido en humedad del papel o cartón.

Cuando los fabricantes del aislamiento de los transformadores de potencia, así como las compañías de electricidad, aplican la espectroscopia dieléctrica es debido a que el envejecimiento y los estados secos del aislamiento del papel/aceite son factores dominantes para la fiabilidad tanto a corto como a largo plazo de los sistemas involucrados en la transmisión de energía eléctrica.

El envejecimiento prematuro del aceite tiene efectos muy nocivos en las constantes dieléctricas que determinan la integridad del aislamiento

Ya que el aislamiento sólido dentro del transformador no es accesible, la principal misión de cualquier procedimiento de diagnóstico, es así una medida de la humedad en el cartón prensado impregnado de aceite sin tener que abrir el transformador para tomar muestras de las localizaciones críticas.

Por lo que llegamos a la conclusión de que mediante la espectroscopia dieléctrica podemos estimar de forma cuantitativa el deterioro del aceite del aislamiento en los transformadores de potencia.

Esta declaración está basada en que a través de las constantes dieléctricas en el dominio del tiempo y de la frecuencia obtenidas por medio de la espectroscopia dieléctrica dan lugar a modelos del aislamiento del transformador con diverso contenido en partículas disueltas.

Las investigaciones básicas de la respuesta dieléctrica del aislamiento compuesto modelaron los espacios del aceite en serie con el cartón prensado impregnado de aceite y los resultados de estas investigaciones demostraron un comportamiento absolutamente diverso de estas clases de sistemas del aislamiento.

Por otra parte, las medidas independientes de la humedad que se realizaron en los componentes de los transformadores nuevamente fabricados, después de las discrepancias producidas por el proceso de secado entre los resultados de la técnica RVM y otras, medidas independientes de la humedad.

Actualmente en los transformadores de potencia se usa el método de la espectroscopia en el dominio de la frecuencia (sistema de documentación funcional) esta medida se puede realizar mediante el analizador de diagnóstico del aislamiento “IDA 200”.

Cada dieléctrico se puede modelar por la conductividad y la constante dieléctrica relativa tanto para el papel como para el aceite (σ_{papel} ϵ_{papel} σ_{aceite} ϵ_{aceite}). La constante del tiempo del proceso de la polarización interfacial es dada de forma cuantitativa por la ecuación siguiente, donde están los grosores del aceite y del papel:

$$\tau = \epsilon_0 \frac{d_{\text{papel}} \epsilon_{\text{aceite}} + d_{\text{aceite}} \epsilon_{\text{papel}}}{d_{\text{papel}} \sigma_{\text{aceite}} + d_{\text{aceite}} \sigma_{\text{papel}}} \quad (47)$$

Sin embargo, esta ecuación no puede simular los espacios dentro de las capas de aislamiento, lo que hace es explicar el cambio en la constante dieléctrica en el dominio del tiempo, que disminuye en su magnitud si esta relación también disminuye.

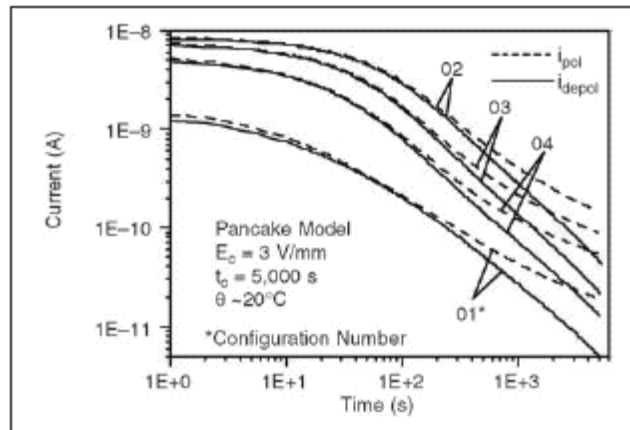


Ilustración 17: Medida de la corriente para muestras con diferentes configuraciones

A continuación, en la ilustración 18, se muestra la siguiente tabla, donde están representadas las curvas de capacidad $C(\omega)$ y la tangente de pérdidas $\tan\delta$, medidos mediante un analizador del espectro dieléctrico, frente a frecuencia para dos configuraciones distintas de aislamiento.

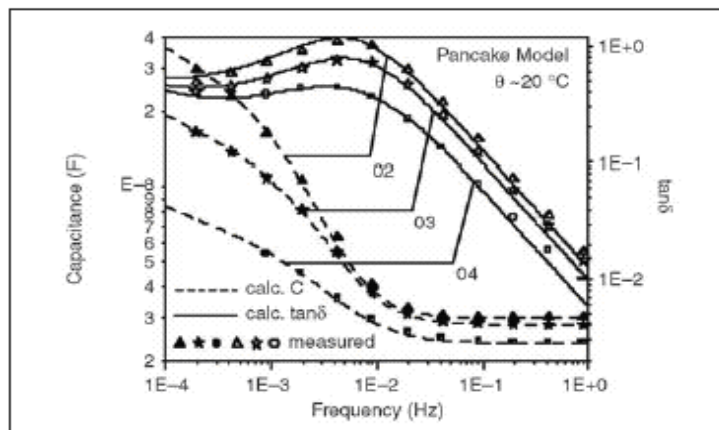


Ilustración 18: Comparativa entre capacidad y la tangente de pérdidas.



Esta comparación demuestra la buena relación que existe entre las medidas y los cálculos para muy bajas frecuencias. El aumento significativo de capacidad y los máximos de la $\text{tg}\delta$, que se muestran en las curvas para bajas frecuencias bajas es debido a que la conductividad del aceite que llena los espacios entre las barreras del cartón prensado es mucho más grande que la conductividad del cartón prensado.

Para frecuencias por debajo de 0.1 Hz, el campo eléctrico dentro del aceite disminuirá y finalmente desaparecerá debido a la baja conductividad, de modo que los espacios ocupados por el aceite se conviertan en electrodos más o menos resistentes entre las barreras del cartón prensado. Este efecto aumenta la "capacidad geométrica" de las diferentes configuraciones de los sistemas de aislamiento para bajas frecuencias.

Los máximos de la $\text{tg}\delta$, son causados por el aumento en la capacidad, ya que la $\text{tg}\delta$, es el cociente entre las pérdidas dependientes de la frecuencia y la capacidad dependiente de la frecuencia.

En resumen, los fenómenos confirman la influencia predominante de la polarización macroscópica interfacial que se presenta en los interfaces entre el aceite y el cartón prensado, que es típico de la respuesta dieléctrica total de sistemas de aislamiento de múltiples capas.

5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

Para poder alcanzar los objetivos propuestos a comienzo de este proyecto había que diseñar unas celdas para el calentamiento del aceite que en un futuro iba a ser tratado en la obtención de los datos. A su vez estas celdas deberían ser posteriormente calentadas para producir el efecto del envejecimiento y mediante los equipos disponibles en el laboratorio poder obtener los datos requeridos y proceder a extraer las conclusiones para las que este proyecto ha sido planteado.

5.1. Metodología del ensayo.

5.1.1. Celda de envejecimiento

La celda tiene una base de acero inoxidable, ya que la misma se utilizó para aplicar el calor necesario para calentar el sistema. La tapa es de teflón y en ella se instalaran un grupo de terminales que permitirán supervisar la temperatura de la celda y realizar las mediciones eléctricas ($\tan\delta$, $\tan\delta(\omega)$, C y $C(\omega)$). El cuerpo de la celda es de teflón.

Se muestra a continuación el ensamblaje de la celda.

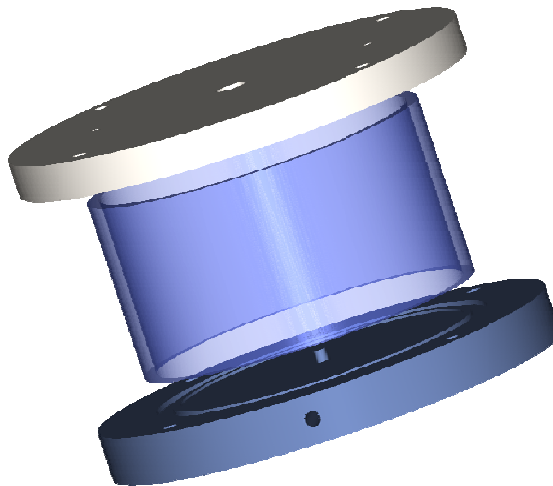


Ilustración 19: Detalles de la Celda de Envejecimiento.

Para el calentamiento de la celda se utilizaron dos resistencias de calefacción cilíndricas como se muestra en la ilustración 20, con una potencia de 300 W cada una. Para mantener la temperatura constante se implementó un sistema de supervisión de temperatura que permitió controlar el encendido/apagado de las resistencias.



Elemento	Valor
Potencia	300 W
Voltaje	240 V
Diámetro	0.635 cm.
Longitud	7.62 cm.
Material recubrimiento	Acero inoxidable
Longitud de los cables	30 cm.
Aislamiento de cables	Fibra de Vidrio



Tabla 8: Características de las Resistencias

Ilustración 20: Resistencia de calentamiento

5.1.2. Montaje del experimento

Las muestras se dividieron en 2 grupos de 15 celdas, uno de los cuales fue envejecido a 100°C y el otro a 120°C. Cada grupo de 10 celdas se dividió en 3 subgrupos, cada uno de los cuales fue sometido a unos voltajes de 1 kV ,500V y 0V respectivamente.

El montaje del experimento se muestra a continuación:

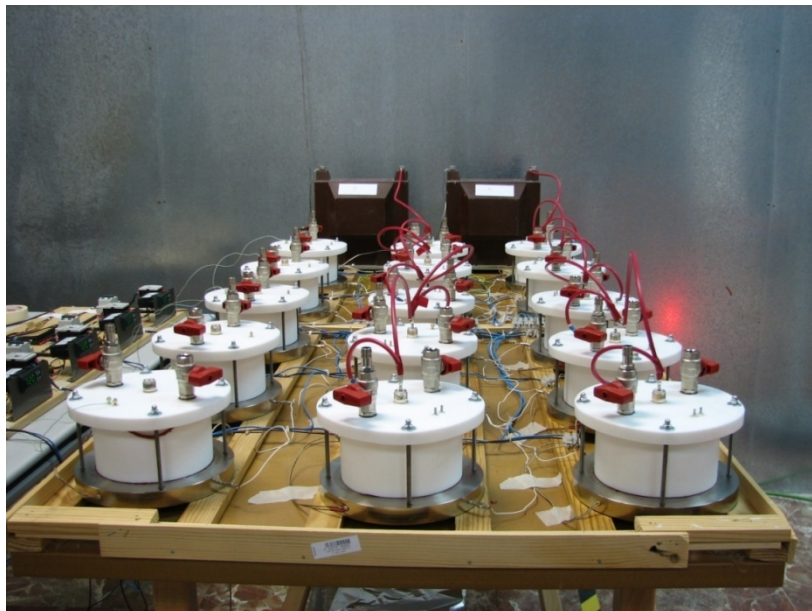


Ilustración 21: Montaje de las celdas de envejecimiento.

El período de envejecimiento para las muestras sometidas a una temperatura de 100°C fue de 1440 horas y para las muestras sometidas a 120°C fue de 1200 horas. La diferencia de tiempos se debió a que al realizar las mediciones de $\tan\delta(\omega)$ en una de las muestras envejecidas a 100°C se encontró una disparidad entre los resultados esperados y los obtenidos.

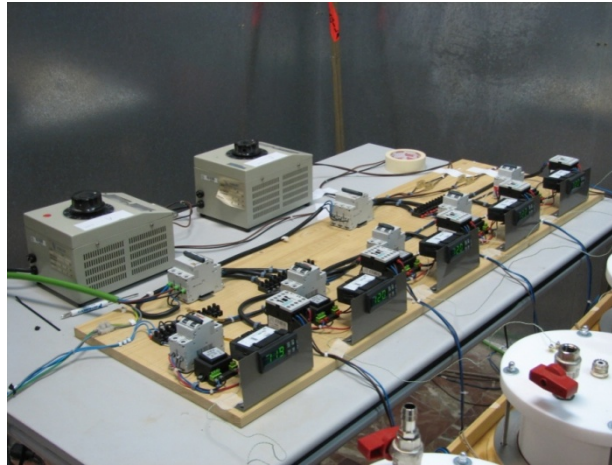


Ilustración 22: Montaje del sistema de monitorización de Tª y calentamiento.

Cada 240 horas se realizaron mediciones de $\tan\delta(\omega)$ y se extrajeron muestras de aceite, de ahí que tengamos cinco tipos de muestras:

Nomenclatura	Equivalencia en horas
Aceite nuevo	0 horas
1	240 horas
2	480 horas
3	720 horas
4	960 horas
5	1200 horas

Tabla 9: Equivalencia en horas de los tipos de aceites usados.

5.1.3. Contenido de humedad en el aceite.

La presencia de humedad en un transformador deteriora el aislamiento de éste. En general, la humedad reduce la vida mecánica del aislamiento directamente proporcional a su contenido en agua, ya que sesga a la mitad la duración de éste si se incrementa en el doble ese contenido acuoso; la relación del deterioro térmico del aceite del aislamiento es, por lo tanto, proporcional a su contenido de agua.

La siguiente tabla muestra los datos de humedad en el aceite y en el papel para muestras envejecidas a 120°C de las que son objeto este proyecto.

Tiempo de Envejecimiento (H.)	120°C/1kV(ppm)	120°C/0.5kV (ppm)	120°C/0kV (ppm)
0	26,87	26,87	26,87
240	24,1	21,1	25,6
480	22,8	26	24,3
720	25	29,1	23,4
960	30,5	29,6	27,5
1200	38,5	24,9	27

Tabla 10: Contenido de humedad en aceite. Muestras envejecidas a 120°C



Se observa como la humedad contenida en el aceite no sigue un orden racional sino que depende siempre del tipo de tensión a la que sea sometida, mostrando fluctuaciones en las cantidades de humedad a lo largo de las horas de envejecimiento.

El agua en el aceite mineral de los transformadores trae el riesgo de formación de burbujas a raíz de la “desorción” del agua de la celulosa, aumentando así la concentración local de gases en el aceite.

La influencia de la humedad en el rendimiento del transformador afecta negativamente tal y como podemos indicar a causa de los antecedentes surgidos en fallos de estos equipos: fallos en el sistema de refrigeración, sobrecargas en el transformador (letales para la máquina), paradas por desconexión en líneas de trabajo que dejan a una gran parte de la población sin servicio.

5.2. Equipos utilizados.

5.2.1. Celda de líquidos

Este equipo necesita un instrumento auxiliar que soporte la muestra a ensayar, siendo utilizada para aceites aislantes la celda de líquidos del IDA, la celda de medida de líquidos aislantes contiene un electrodo coaxial, dos termómetros digitales para la temperatura de los electrodos así como un alojamiento con los conectores correspondientes.

Algunas de las especificaciones más interesantes del equipo son:

Clase de protección	IP00
Temperatura de operación	+5°C a +60°C
Tensión máxima de voltaje	2kV AC
Humedad de operación	≤85%
Cantidad de líquido requerido	30ml
Dimensiones de la celda	150mm x 200mm
Rango de medidas de frecuencias	10-400Hz
Factor de pérdidas tg δ en aire	≤3·10 ⁻⁵
Capacidad celda en vacío Co	≤50pF

Tabla 11: Especificaciones técnicas de la celda de líquidos.

El aceite aislante a estudiar introducido dentro de dicha celda y medida así su resistencia volumétrica de manera directa. La resistencia volumétrica es definida como la resistencia eléctrica por centímetro cúbico de material aislante y es expresada en ohmio centímetro ($\Omega \cdot \text{cm}$).

En el cálculo geométrico necesario se tuvieron en cuenta las dimensiones indicadas del condensador cilíndrico que compone esta celda. Para poder hacer más fácil este cálculo del condensador cilíndrico, se dividió su geometría en un cilindro de diámetro (d) y altura (b) y en un cono truncado de diámetro mayor (d), diámetro menor (e) y altura (c), tal y como puede observarse en la figura anterior. Sus dimensiones son:

- a = 96.24mm (altura de celda)
- b = 41.5mm (altura de cilindro)
- c = 6.24mm (altura de cono truncado)
- d = 55mm (radio cilindro)
- e = 10.6mm (radio menor cono truncado)
- Separación entre placas = 2mm

En la ilustración 23 se muestran las partes de la celda, y en color amarillo queda reflejada la ocupación del líquido aislante una vez introducido.

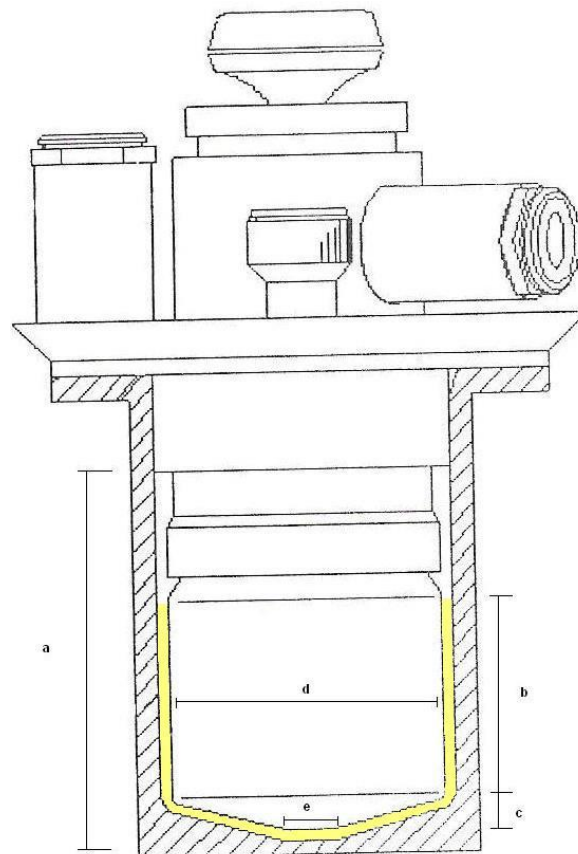


Ilustración 23: Celda de líquidos acotada.

La resistencia volumétrica es medida aplicando un potencial de tensión a través de los electrodos de la celda de líquidos de rodean la muestra aislante, midiendo así la corriente que circula por el aceite y obteniendo automáticamente un valor de resistencia automático.

5.2.2. IDA 200. Sistema de diagnóstico del aislamiento

El IDA 200 [15] permite comprobar el estado del material aislante en la mayoría de los objetos de una instalación de alta tensión (como, por ejemplo, transformadores de potencia, transformadores de medida, casquillos, cables aislados por papel, etc.). Las mediciones de diagnóstico se realizan aplicando tensiones relativamente bajas, de hasta 140 V como máximo.

Con este equipo hemos podido medir las pérdidas dieléctricas ($\tan\delta$, PF) y la capacidad en frecuencias discretas, por encima y por debajo de la frecuencia de la red eléctrica. Al evitar la frecuencia de la red eléctrica y sus armónicos, la influencia de las perturbaciones y sus efectos distorsionantes pueden filtrarse de un modo eficaz.



Ilustración 24: Equipo de medida de la respuesta dieléctrica en el dominio del tiempo

Al medir a distintas frecuencias y obtener una curva en vez de un punto, es posible compensar de forma precisa las diferencias de temperatura que pueden producirse al realizar mediciones distintas. Esto quiere decir que la independencia en temperatura se consigue con este método.

5.2.3. MODS – Herramienta para análisis de resultados de medidas

Para la determinación de la cantidad de humedad que contiene el aceite prensado en un transformador, el sistema IDA 200 incluye un programa de análisis llamado MODS.

Con los resultados de las medidas realizadas con el IDA 200 y la temperatura del aislante durante el proceso de medida, es posible diferenciar las respuestas del aceite, así como obtener una estimación acertada del estado de las propiedades del aceite introducido.

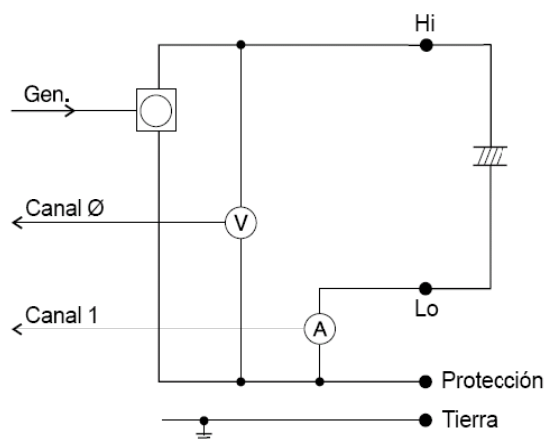


Ilustración 25: Diagrama esquemático de bloques del sistema IDA 200.

El sistema mide la impedancia de una muestra a una frecuencia y tensión variables. Una unidad de Proceso de señal digital genera una señal de comprobación a la frecuencia deseada. Esta señal es amplificada con un amplificador interno y, a continuación, se aplica a la muestra. Se mide la intensidad que atraviesa la muestra y la tensión con gran precisión mediante un divisor de tensión y un amperímetro.

Para la entrada de medición, el IDA 200 utiliza una unidad DSP que multiplica las señales de entrada (medición) con tensiones sinusoidales de referencia y, a continuación, integra los resultados en varios ciclos. Mediante este método, se elimina casi todo el ruido y las interferencias y permite que el IDA 200 trabaje con niveles bajos de tensión con una precisión muy alta.

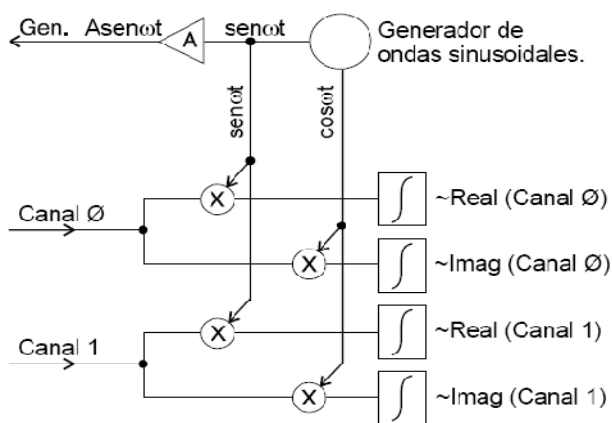


Ilustración 26: Principio de la técnica de correlación sinusoidal.

Este instrumento está pensado para obtener datos dentro de los siguientes rangos, aunque debido a las limitaciones de intensidad, el límite superior de la frecuencia puede ser más bajo:

Temperatura de funcionamiento	0°C a +55°C
Capacidad de muestreo	Rango 10 pF – 100 μF
Frecuencia de muestreo	Rango 0,0001 Hz - 1 kHz

Tabla 12: Rangos y temperaturas de funcionamiento.



Se muestra gráficamente la imprecisión de la medición dependiendo de la capacidad de muestreo y de la frecuencia de medición. [16]

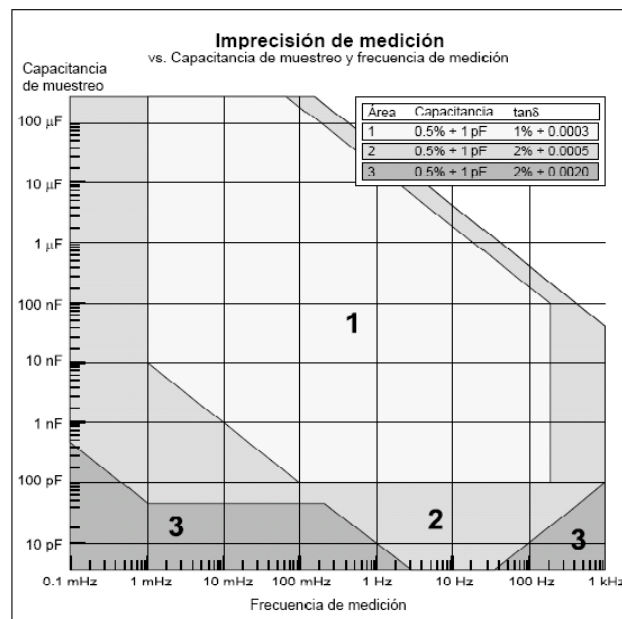


Ilustración 27: Imprecisión en la medición del IDA_200

6. RESULTADOS.

Se ha podido conocer el comportamiento del aceite mineral aislante en diferentes condiciones de envejecimiento y humedad gracias a los ensayos realizados con el equipo IDA 200 del laboratorio de la universidad Carlos III de Madrid, con el que se ha analizado en FDS el comportamiento del aceite en una amplia gama de frecuencias.

Se han tratado las muestras desde el enfoque del envejecimiento, es decir, según las horas que han estado sometidas a tensión.

Siempre se tuvieron muy en cuenta la tabla de porcentajes de humedades en el aceite ya que, como se ha visto anteriormente, la cantidad de agua disuelta en este hace que varíen considerablemente sus propiedades físicas.

Se ha incluido las muestras de aceite envejecido junto con el aceite aislante nuevo (tomado con las condiciones con las que llegó de fabrica) sin tratamiento específico previo de envejecido ni habiendo aplicado tensión, en la misma tabla con el objetivo de que las comparaciones fuesen más evidentes y poder apreciar mejor los cambios que a lo largo de la frecuencia se van produciendo en cada propiedad.

A continuación se mostraran las graficas divididas según el efecto producido en cada una de las características estudiadas del aceite, y subdivididas posteriormente según las horas de envejecimiento. A su vez, se mostraran los datos recogidos a las diferentes tensiones, tanto a 5V como a 140V, para poder comprobar así cualquier cambio que se haya producido en las propiedades del aceite.

6.1. Mediciones del factor de disipación (tag δ)

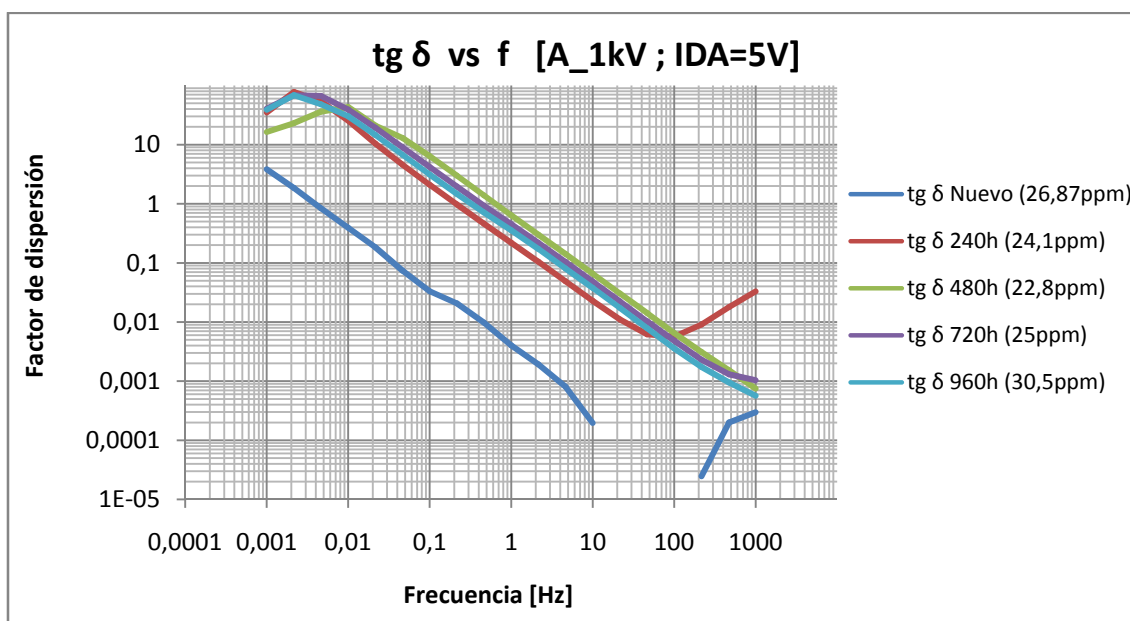


Ilustración 28: Tang δ para un envejecimiento con 1kV y tensión IDA de 5V



En la gráfica se puede apreciar que la mayor diferencia en los valores de la $\tan \delta$ se producen para muy baja frecuencia ($<10\text{MHz}$). Para valores comprendidos entre 10MHz - 100Hz la $\tan \delta$ se asemeja a una recta, la cual coincide con el hecho que la conductividad en esa zona es prácticamente constante.

A continuación se muestran los datos facilitados por el aparato de medición para una tensión de envejecimiento de 1kV y aplicándole 5V para la obtención de datos.

f	$\tan \delta$ Nuevo (26,87ppm)	$\tan \delta$ 240h (24,1ppm)	$\tan \delta$ 480h (22,8ppm)	$\tan \delta$ 720h (25ppm)	$\tan \delta$ 960h (30,5ppm)
1000	0,00029862	0,032974	0,00074777	0,0010363	0,00056466
470,59	0,0001997	0,017846	0,0015244	0,0013077	0,00094797
216,22	2,46E-05	0,0090407	0,0030992	0,0022994	0,001741
100	-0,00012619	0,0056311	0,0065351	0,004823	0,0035926
46,512	9,08E-06	0,0061865	0,014175	0,010282	0,0078578
21,563	-2,42E-05	0,01106	0,030408	0,022455	0,017335
10	0,00019635	0,022864	0,065969	0,048296	0,037765
4,6417	0,00080809	0,04865	0,142	0,10352	0,080383
2,1546	0,0019149	0,10413	0,30007	0,21825	0,17177
1	4,03E-03	0,21966	0,63914	0,45072	0,35545
0,46417	0,0097538	0,46042	1,3908	0,92655	0,71144
0,21544	2,06E-02	0,9714	2,9935	1,9602	1,4669
0,1	3,31E-02	2,0901	6,3724	4,1748	3,1147
0,046416	0,073938	4,5952	12,987	9,0018	6,7495
0,021544	0,1831	10,386	21,063	19,211	14,535
0,0099999	0,39125	25,467	43,431	39,157	30,255
0,0046415	0,83726	53,974	36,117	66,538	48,08
0,0021543	1,8536	77,607	23,025	68,63	68,565
0,00099988	3,825	35,031	16,4	40,739	39,044

Tabla 13: Datos de la $\tan \delta$ en muestras de aceite envejecidas a 1kV .

Se ha incluido la gráfica más detallada de la muestra de aceite sin tratar, junto con la muestra de mayor envejecimiento y la de menor envejecimiento para apreciar mejor las diferencias producidas en ellas.

Cabe destacar que para los valores medios de frecuencia, entre los que está incluida la frecuencia de red, el equipo tiene problemas de sensibilidad, esto ocurre para este nivel de tensión y esta gama de frecuencias (10Hz - 100Hz).

El pico producido por las gráficas a muy baja frecuencia es debido a un cambio brusco en la capacidad.

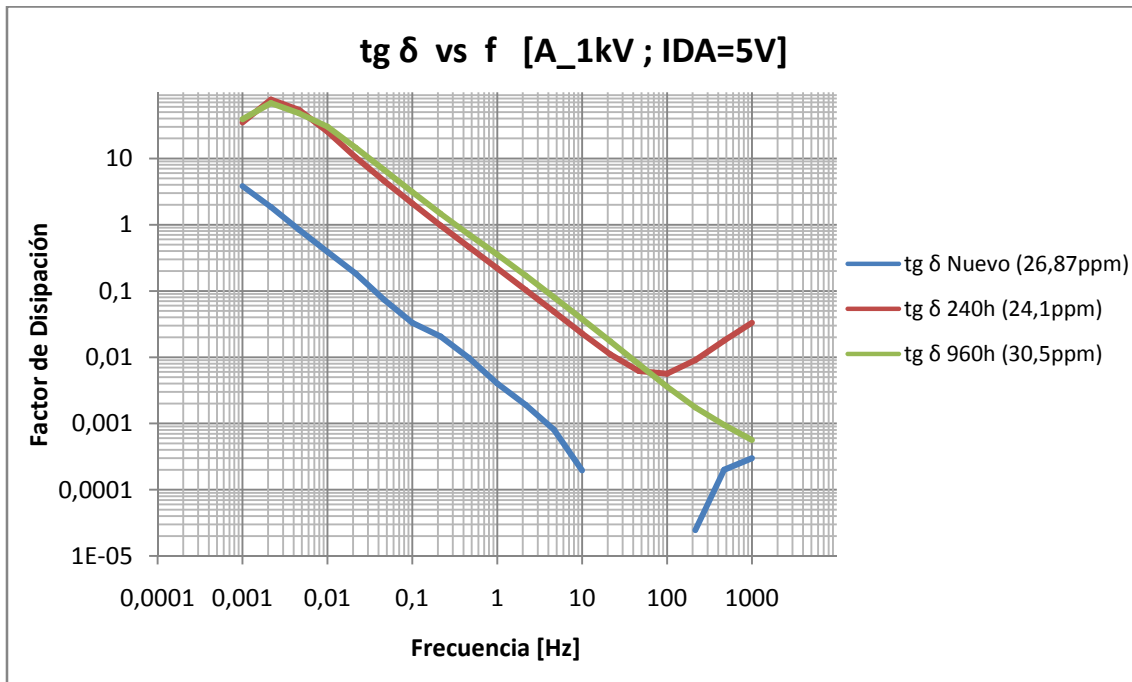


Ilustración 29: Tag δ de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 1kV.

A continuación, en la ilustración 30, se muestran la grafica perteneciente a los valores de las muestras para una tensión de envejecimiento de 0,5kV y con una medición de 5V.

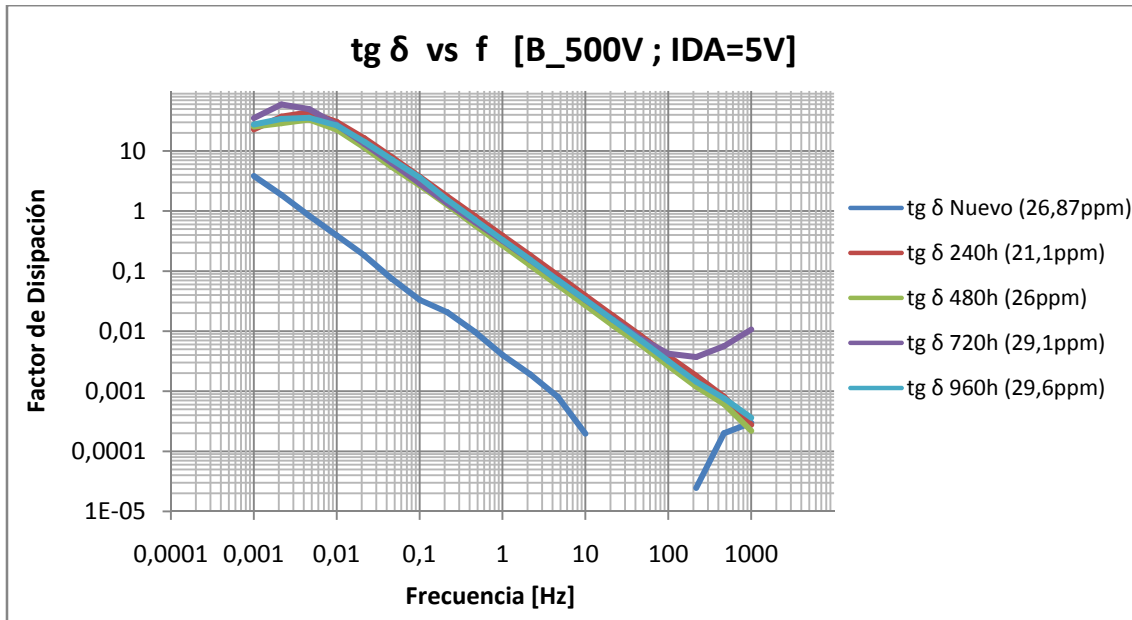


Ilustración 30: Tang δ para un envejecimiento con 0.5kV y tensión IDA de 5V

Las variaciones que se aprecian a baja frecuencia equivalen a variaciones producidas en la conductividad.



Los datos para un envejecimiento de 120°C y una tensión de 0,5kV son:

f	tg δ Nuevo (26,87ppm)	tg δ 240h (21,1ppm)	tg δ 480h (26ppm)	tg δ 720h (29,1ppm)	tg δ 960h (29,6ppm)
1000	0,00029862	0,00027663	0,00022004	0,010636	0,00036167
470,59	0,0001997	0,00080939	0,0006126	0,0056352	0,00076403
216,22	2,46E-05	0,0018079	0,0011918	0,0037083	0,0014476
100	-0,00012619	0,0038392	0,0026412	0,0042324	0,0031843
46,512	9,08E-06	0,0084036	0,0059531	0,0075119	0,0070435
21,563	-2,42E-05	0,018057	0,012331	0,015584	0,015279
10	0,00019635	0,039194	0,026952	0,033267	0,03342
4,6417	0,00080809	0,084706	0,058491	0,071038	0,070657
2,1546	0,0019149	0,18256	0,12506	0,15259	0,15437
1	4,03E-03	0,389	0,26932	0,32067	0,33164
0,46417	0,0097538	0,82476	0,57862	0,65343	0,71039
0,21544	2,06E-02	1,7405	1,2683	1,3526	1,5316
0,1	3,31E-02	3,7	2,6797	2,8694	3,5995
0,046416	0,073938	7,8648	5,3978	6,2071	7,1755
0,021544	0,1831	16,29	11,395	13,119	14,232
0,0099999	0,39125	30,439	22,667	27,309	26,662
0,0046415	0,83726	43,997	33,364	49,698	35,665
0,0021543	1,8536	37,322	28,953	59,305	34,133
0,00099988	3,825	22,851	25,456	35,208	27,62

Tabla 14: Datos de la tag δ en el aceite envejecido a 0,5kV.

A continuación se muestra únicamente las curvas pertenecientes a un mayor y menor tiempo de envejecimiento, así como la curva de la muestra de aceite nuevo.

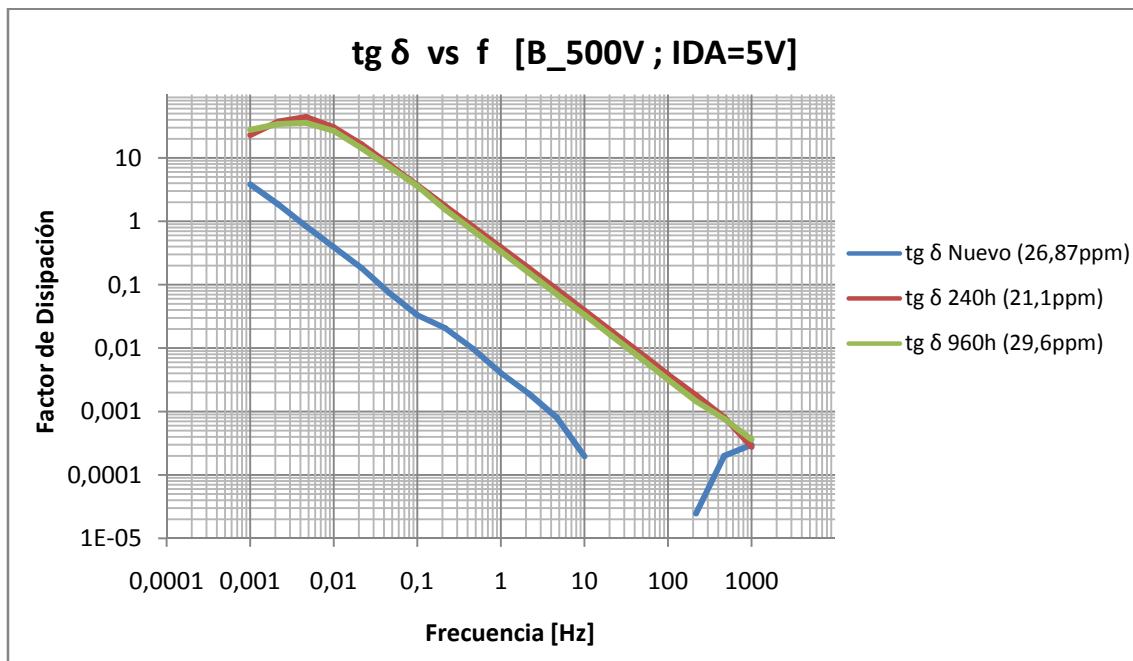


Ilustración 31: Tag δ de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 0,5kV.

En la ilustración 31 se muestran las graficas obtenidas a partir de los datos de la tabla 15 correspondientes al factor de pérdidas del aceite mineral aislante envejecido sin haberle aplicado tensión, únicamente con el envejecimiento de la temperatura (120°C).

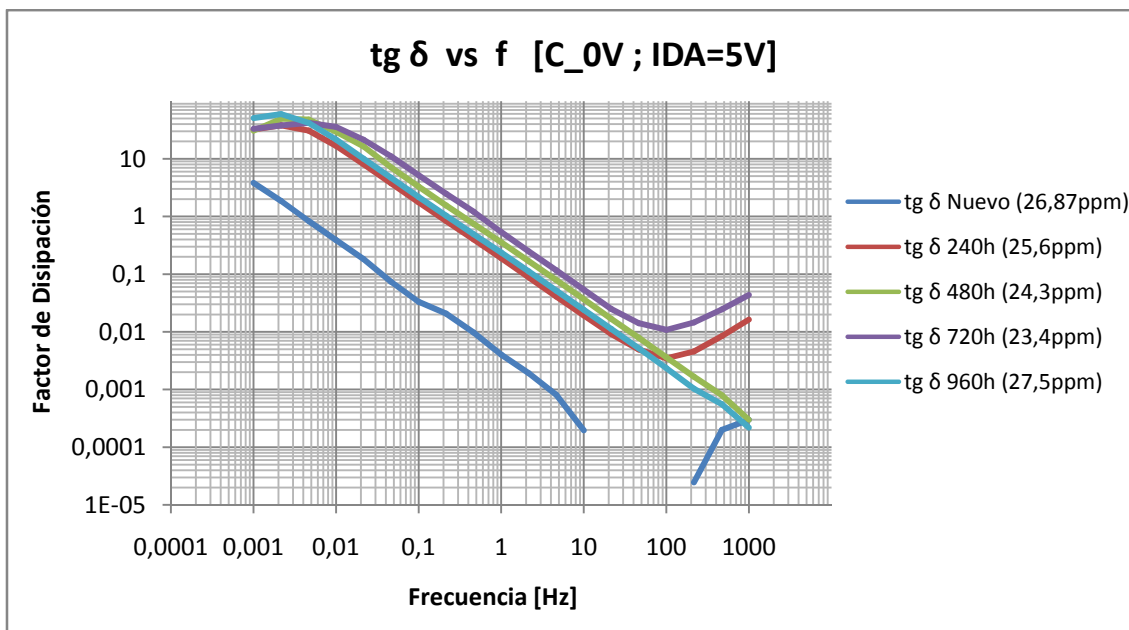


Ilustración 32: Tang δ para un envejecimiento con 0kV y tensión IDA de 5V

f	tg δ Nuevo (26,87ppm)	tg δ 240h (25,6ppm)	tg δ 480h (24,3ppm)	tg δ 720h (23,4ppm)	tg δ 960h (27,5ppm)
1000	0,00029862	0,016347	0,00029788	0,043594	0,0002183
470,59	0,0001997	0,0084391	0,00079459	0,024584	0,00055418
216,22	2,46E-05	0,0045811	0,0016719	0,014588	0,0010319
100	-0,00012619	0,0034667	0,0036035	0,010815	0,0023376
46,512	9,08E-06	0,0049386	0,0078762	0,014132	0,005175
21,563	-2,42E-05	0,0091615	0,016725	0,024813	0,011182
10	0,00019635	0,019278	0,036668	0,053906	0,024128
4,6417	0,00080809	0,040914	0,078876	0,11671	0,051869
2,1546	0,0019149	0,088438	0,16866	0,24903	0,11168
1	4,03E-03	0,18945	0,35646	0,53715	0,23771
0,46417	0,0097538	0,4002	0,74408	1,2086	0,49301
0,21544	2,06E-02	0,835	1,5549	2,4731	1,032
0,1	3,31E-02	1,769	3,3084	5,2119	2,1856
0,046416	0,073938	3,767	7,0988	11,037	4,7026
0,021544	0,1831	8,0768	16,414	21,472	10,074
0,0099999	0,39125	16,885	29,491	35,808	21,562
0,0046415	0,83726	31,026	48,066	41,906	42,08
0,0021543	1,8536	38,171	49,614	37,877	59,584
0,00099988	3,825	32,4	30,705	33,206	50,908

Tabla 15: Datos de la tag δ de las muestras envejecidas sin tensión.

Como en los dos casos anteriores de muestras envejecidas aplicándoles tensión, de 1kV y 0,5kV respectivamente, se muestra similar tendencia en todas las curvas.

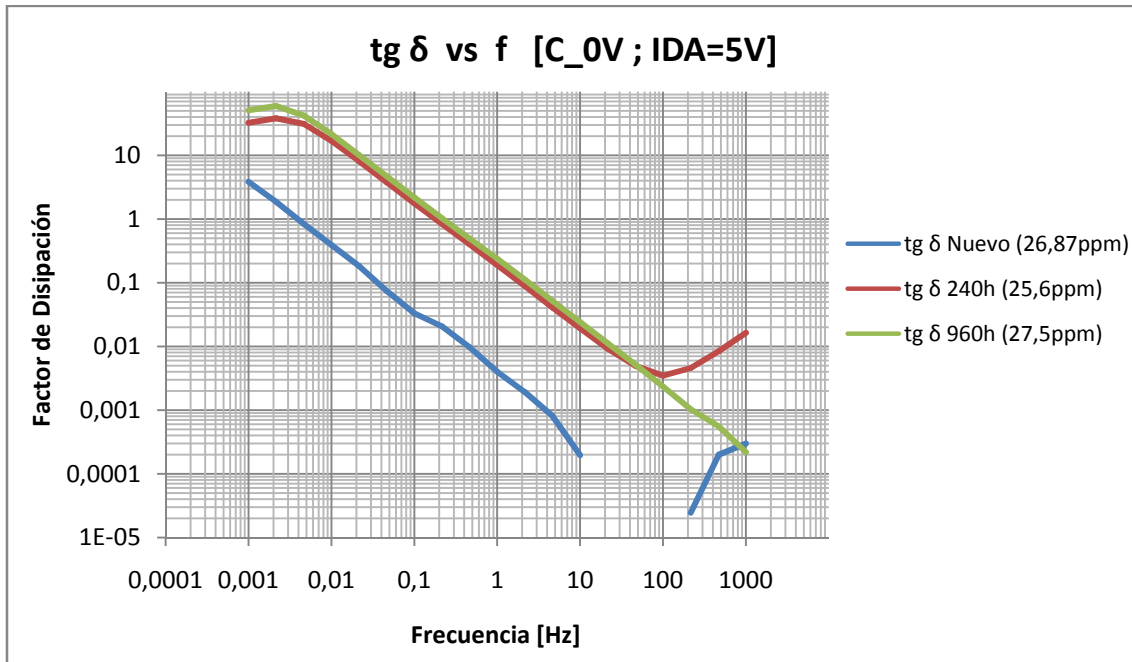


Ilustración 33: Tag δ de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 0V.

6.1.1. Efecto de la tensión de medición en la tag δ de las muestras

En este apartado se va a comprobar si existe algún tipo de cambio en la tag δ según se realicen las pruebas con el IDA a unos niveles de tensión de 5V o de 140V.

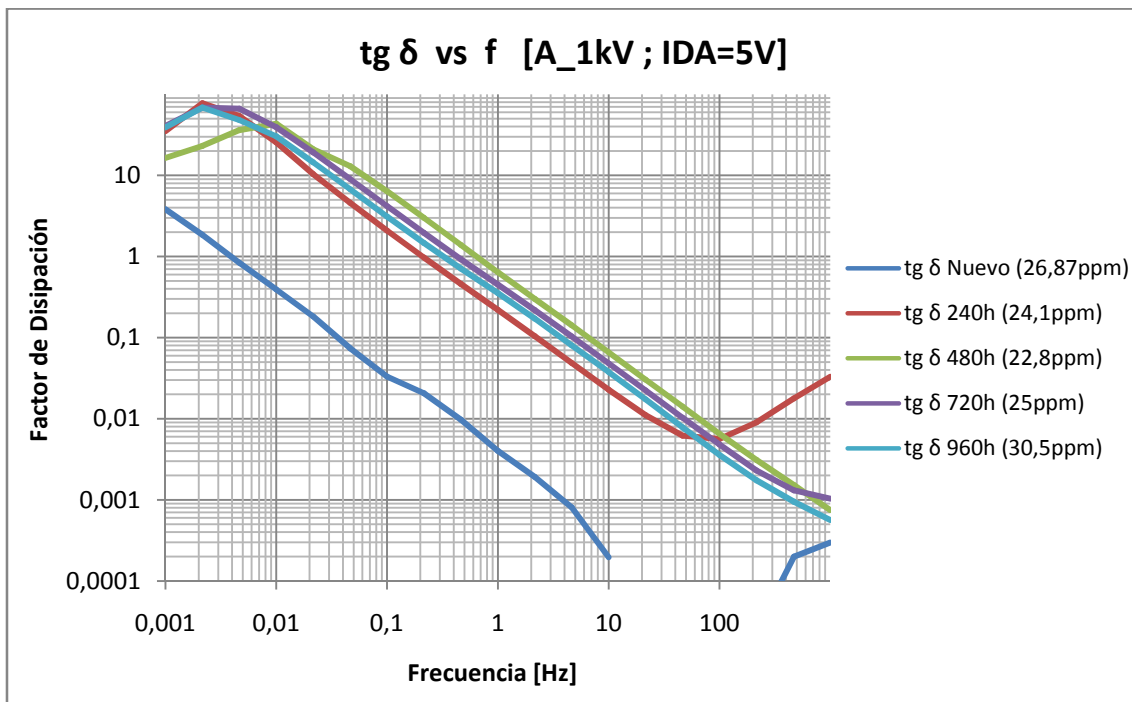


Ilustración 34: Tang δ para un envejecimiento con 1kV y tensión IDA de 5V

La forma de variar los datos para 140V se produce de una manera más suave, apreciándose una menor diferencia entre las muestras sometidas a 5 periodos de envejecimiento.

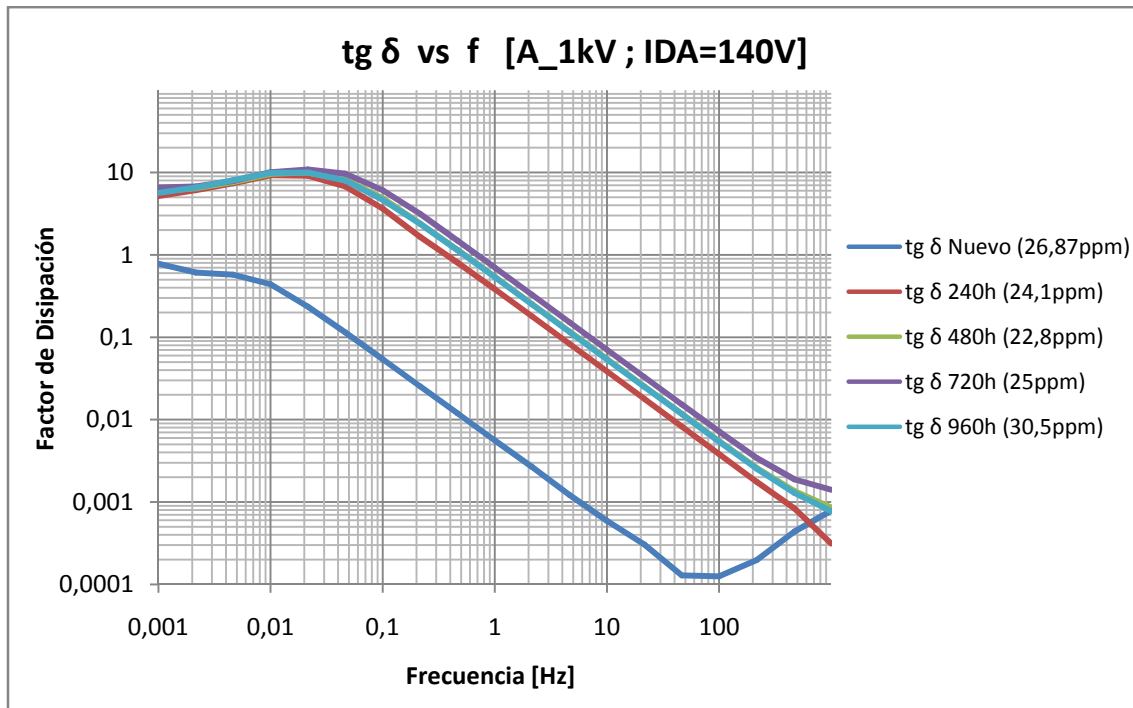


Ilustración 35: Tang δ para un envejecimiento con 1kV y tensión IDA de 140V

Cabe destacar que se produce una diferencia muy significativa en la representación de la curva del aceite mineral sin envejecer, puesto que existe un rango de frecuencias que con 5V no aparece grafica alguna pero si se representa con un muestreo 140V. Esto es debido por la mejor conducción que puede hacer efectiva el equipo, dado que con un aumento de corriente con un muestreo de 140V el IDA 200 conduce mejor.

Comparando ambas gráficas se puede afirmar que para muy baja frecuencia se observa una mayor diferenciación de las curvas para una tensión de 5V, donde el cambio en la tendencia de las curvas se muestra para una frecuencia de 0,002Hz, mientras que para 140V este cambio se produce a posteriori.

Se denota un menor factor de pérdidas para las curvas con 140V, lo cual se corresponde con una disminución de la conductividad de las muestras de aceite.

Podemos observar similares efectos en las graficas 36 y 37, pertenecientes a la muestra de aceite realizada con un envejecimiento de 500V, y con una tensión de medición de 5V y 140V respectivamente.

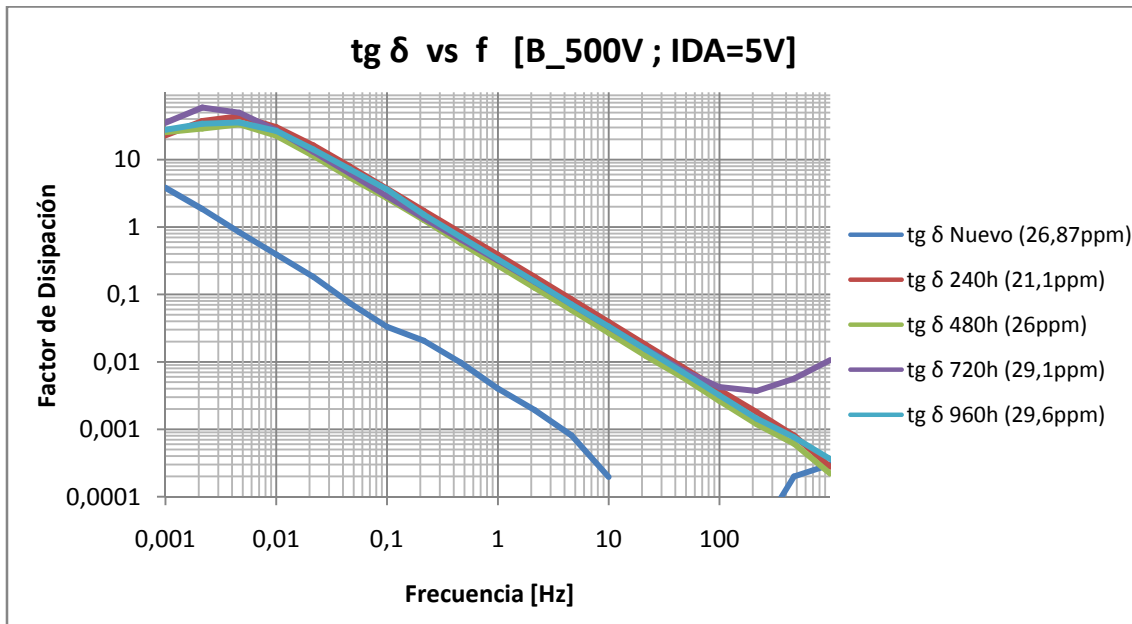


Ilustración 36: Tang δ para un envejecimiento con 0,5kV y tensión IDA de 5V

Existe una diferencia en los valores máximos del factor de perdidas en las muestras analizadas. Para una medición realizada con menor voltaje, se obtienen unos valores mayores de pérdidas que para un muestreo con 140V.

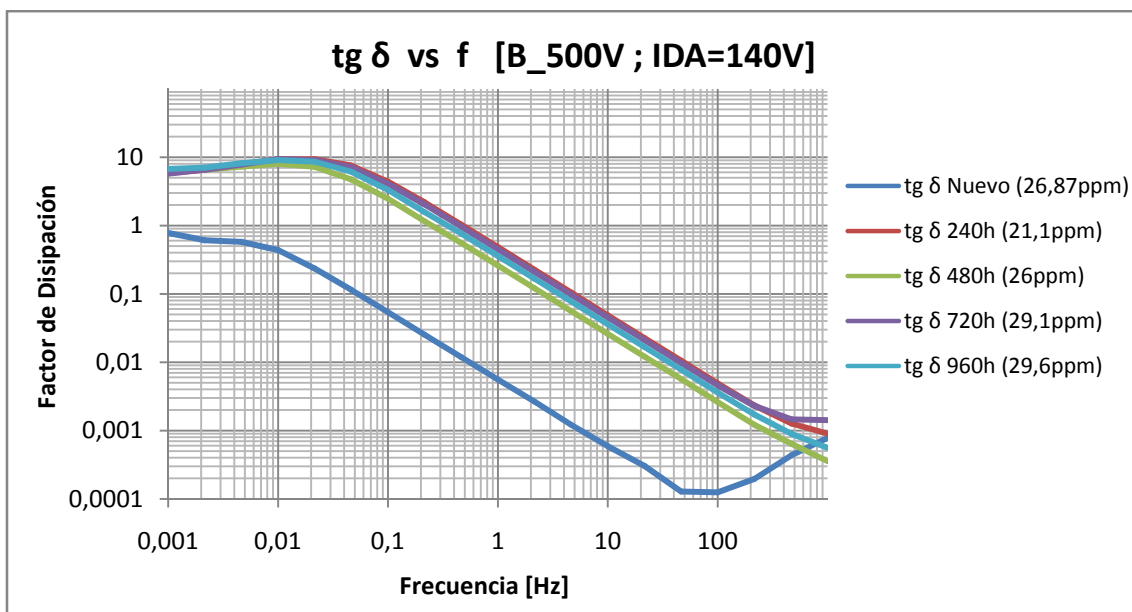


Ilustración 37: Tang δ para un envejecimiento con 0,5kV y tensión IDA de 140V

Por los datos obtenidos en estas graficas, no se puede afirmar que la humedad sea la responsable del aumento de la tag δ , si bien, este fenómeno si se aprecia a muy baja frecuencia.

A continuación se muestran las gráficas pertenecientes a las muestras envejecidas únicamente con temperatura de 120°C y sin tensión.

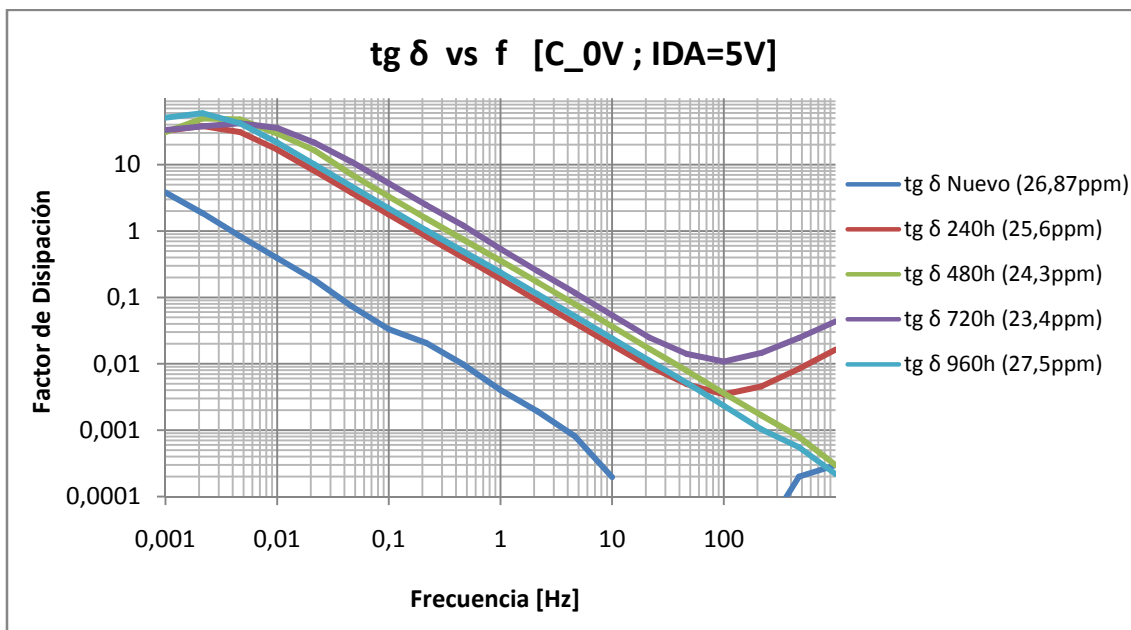


Ilustración 38: Tang δ para un envejecimiento con 0V y tensión IDA de 5V

En la siguiente ilustración se puede apreciar como se produce, a muy baja frecuencia, un fenómeno de conducción mayor, aun manteniéndose la misma conductividad.

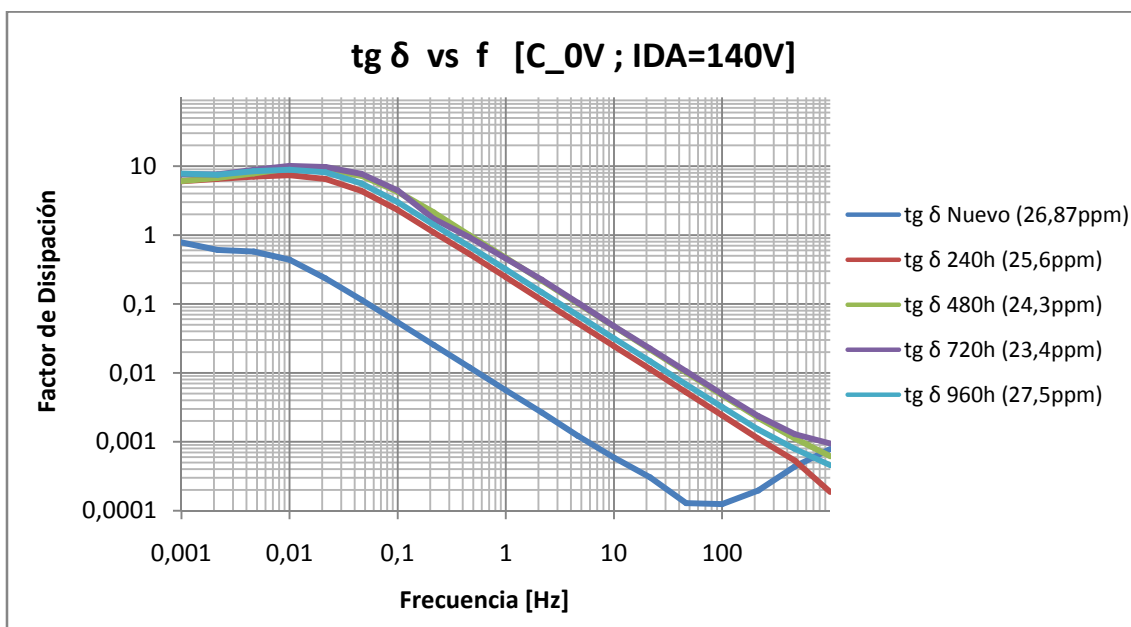


Ilustración 39: Tang δ para un envejecimiento con 0V y tensión IDA de 140V

Comprobamos que los efectos en todos los casos analizados son idénticos, sin que exista alguna diferencia clara entre el comportamiento de las distintas muestras.

6.1.2. Variación de la $\tan \delta$ en función del tiempo de envejecimiento

Los datos obtenidos en la medición del factor de pérdidas son los siguientes:

	A_1kV 1mHz	B_500V 1Hz	C_0V 50Hz	A_1kV 1mHz	B_500V 1Hz	C_0V 50Hz	A_1kV 1mHz	B_500V 1Hz	C_0V 50Hz
0h.	3,825	3,825	3,825	4,0252E-03	4,0252E-03	4,0252E-03	9,08E-06	9,08E-06	9,08E-06
240h.	35,031	22,851	32,4	0,21966	0,389	0,18945	0,0061865	0,0084036	0,0049386
480h.	16,4	25,456	30,705	0,63914	0,26932	0,35646	0,014175	0,0059531	0,0078762
720h.	40,739	35,208	33,206	0,45072	0,32067	0,53715	0,010282	0,0075119	0,014132
960h.	39,044	27,62	50,908	0,35545	0,33164	0,23771	0,0078578	0,0070435	0,005175

Tabla 16: Datos de la $\tan \delta$ en función del tiempo de envejecimiento.

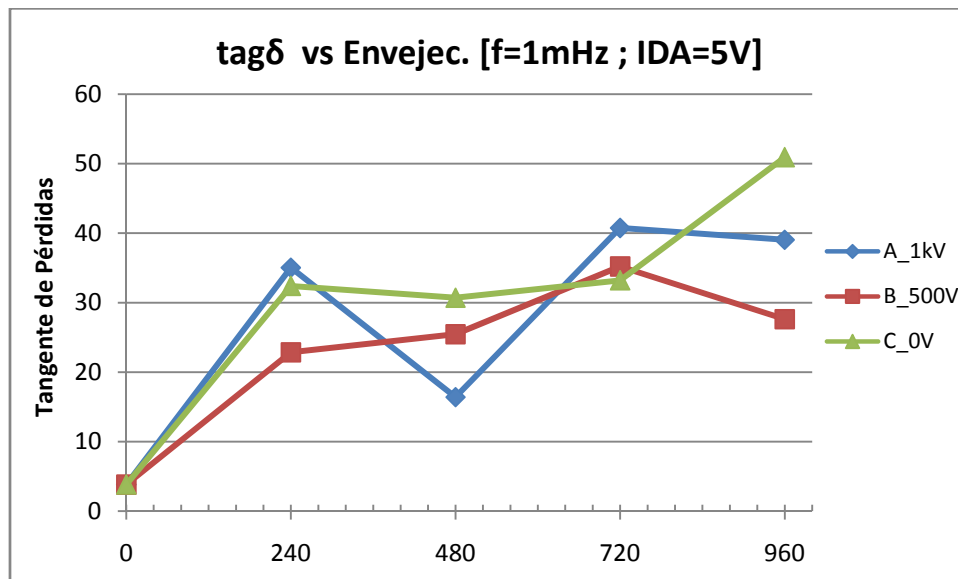


Ilustración 40: Factor de disipación con datos tomados a una frecuencia de 1mHz

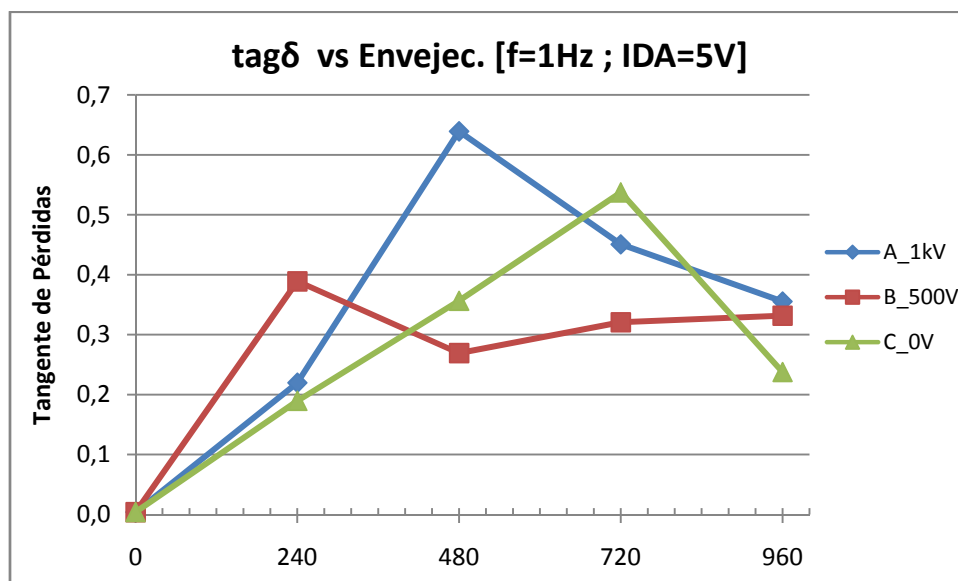


Ilustración 41: Factor de disipación con datos tomados a una frecuencia de 1Hz

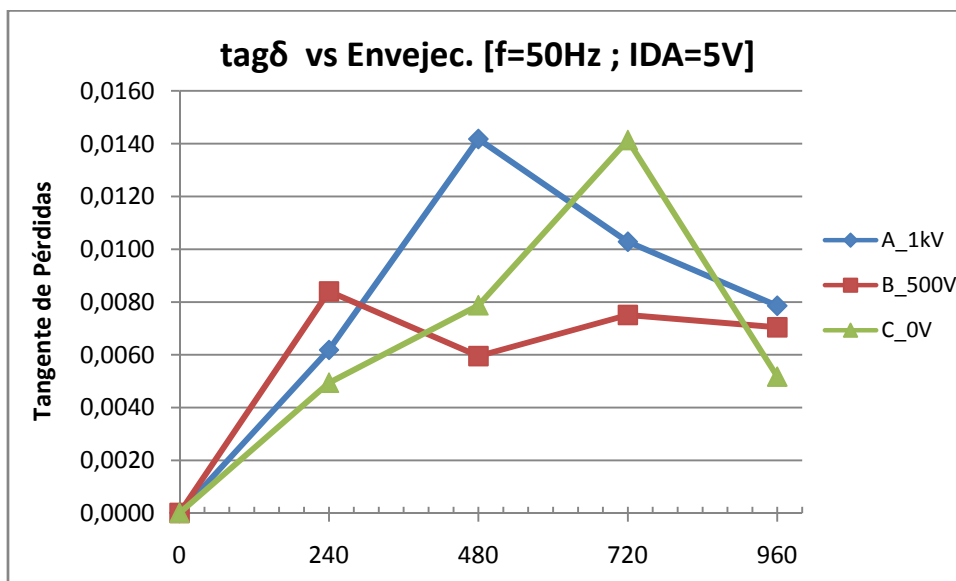


Ilustración 42: Factor de disipación con datos tomados a una frecuencia de 50Hz

Se puede concluir que en todos los niveles de frecuencia se aprecia la misma evolución de las curvas, existe una clara tendencia a aumentar el factor de pérdidas conforme aumenta el tiempo de envejecimiento. Este aumento es mucho mayor en baja frecuencia, donde la diferencia entre curvas es más evidente, por lo que resulta una mejor manera de medir la $\text{tag}\delta$ si nos fijamos en los niveles de frecuencia menores.

También se puede concluir que cuanto mayor sea la tensión a la que ha sido sometido el aceite en su envejecimiento, el factor de pérdidas es mayor.

Se comprueba observando las tablas de datos, que existe una proporcionalidad directa entre las pérdidas producidas en el aceite y la conductancia del mismo.

6.2. Mediciones de la capacitancia (c)

En las siguientes gráficas podremos apreciar las variaciones de la capacitancia de las diferentes muestras de aceite mineral aislante.

Al igual que en el punto anterior se analizarán las gráficas obtenidas a través de la tabla de datos proporcionada por el aparato de medición IDA 200 utilizando una tensión de medición de 5V.

Se observa cómo para una tensión de envejecimiento de 1kV es la muestra con un envejecimiento de 480h la que mayor capacidad presenta. Esto es debido al menor porcentaje de humedad existente en esa muestra de aceite.

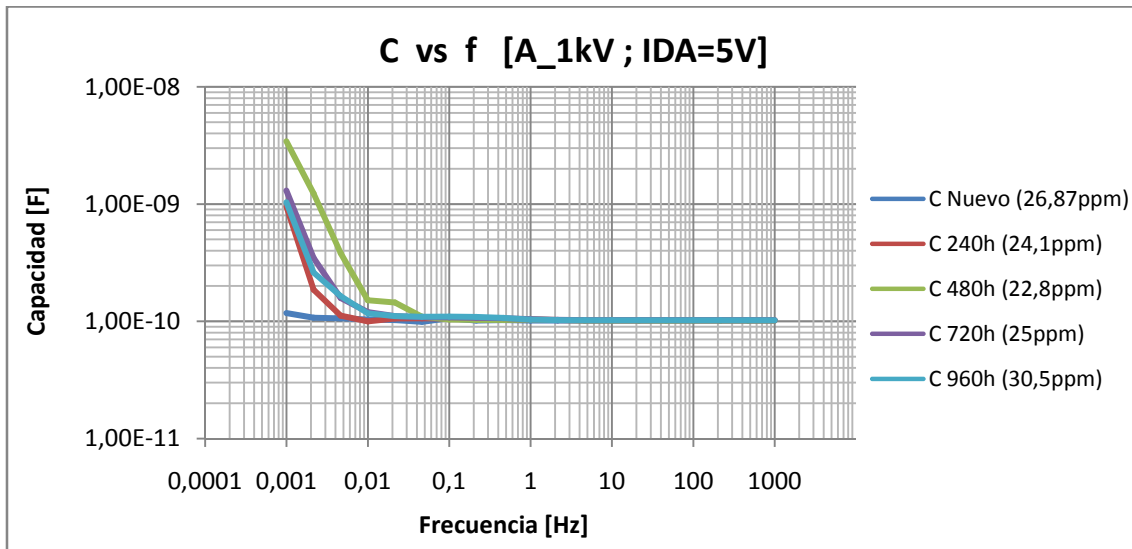


Ilustración 43: Capacidad para un envejecimiento con 1kV y tensión IDA de 5V

Se puede verificar, gracias a la tabla 17, como la capacidad permanece constante a partir de una frecuencia de 0,02Hz, por lo que se recomienda fijarse en los valores de muy baja frecuencia para poder encontrar las diferencias en los distintos tipos de aceite en cuanto a la capacitancia se refiere.

f	C Nuevo (26,87ppm)	C 240h (24,1ppm)	C 480h (22,8ppm)	C 720h (25ppm)	C 960h (30,5ppm)
1000	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
470,59	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
216,22	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
100	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
46,512	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
21,563	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
10	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
4,6417	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,03E-10	1,02E-10
2,1546	1,01E-10	1,03E-10	1,03E-10	1,03E-10	1,02E-10
1	1,01E-10	1,04E-10	1,04E-10	1,05E-10	1,03E-10
0,46417	1,03E-10	1,04E-10	1,03E-10	1,06E-10	1,07E-10
0,21544	1,02E-10	1,05E-10	1,03E-10	1,07E-10	1,09E-10
0,1	1,06E-10	1,06E-10	1,04E-10	1,08E-10	1,10E-10
0,046416	9,91E-11	1,06E-10	1,09E-10	1,09E-10	1,10E-10
0,021544	1,02E-10	1,06E-10	1,45E-10	1,11E-10	1,11E-10
0,0099999	1,04E-10	1,00E-10	1,51E-10	1,20E-10	1,17E-10
0,0046415	1,06E-10	1,12E-10	3,82E-10	1,58E-10	1,64E-10
0,0021543	1,07E-10	1,86E-10	1,23E-09	3,47E-10	2,61E-10
0,00099988	1,18E-10	9,53E-10	3,43E-09	1,30E-09	1,04E-09

Tabla 17: Datos de la C en las muestras de aceite envejecidas a 1kV.

En la siguiente imagen se puede apreciar mejor la diferencia existente, a muy baja frecuencia, ente las curvas de mayor y menor tiempo de envejecimiento.

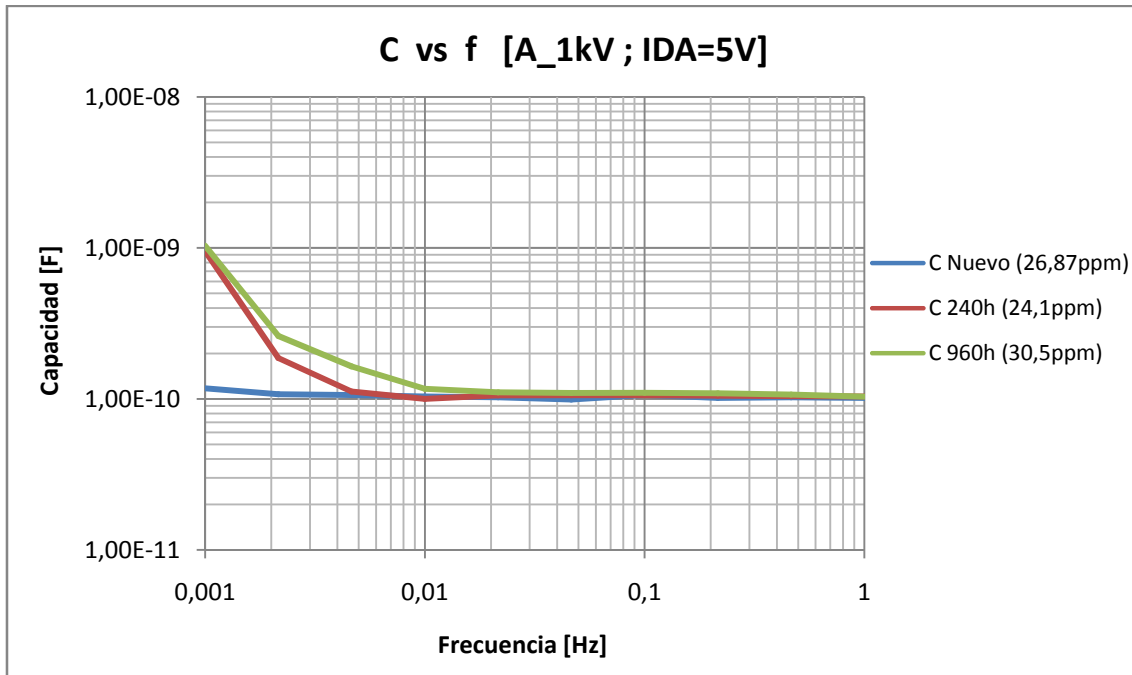


Ilustración 44: C de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 1kV.

Se muestra a continuación los valores y gráficas obtenidos a partir de una tensión de envejecimiento de 500V y una medición a 5V para la toma de datos.

De nuevo se puede observar cómo es la muestra que menor humedad tiene, en este caso corresponde a la de menor tiempo de envejecimiento, la que posee un valor mayor en la capacidad.

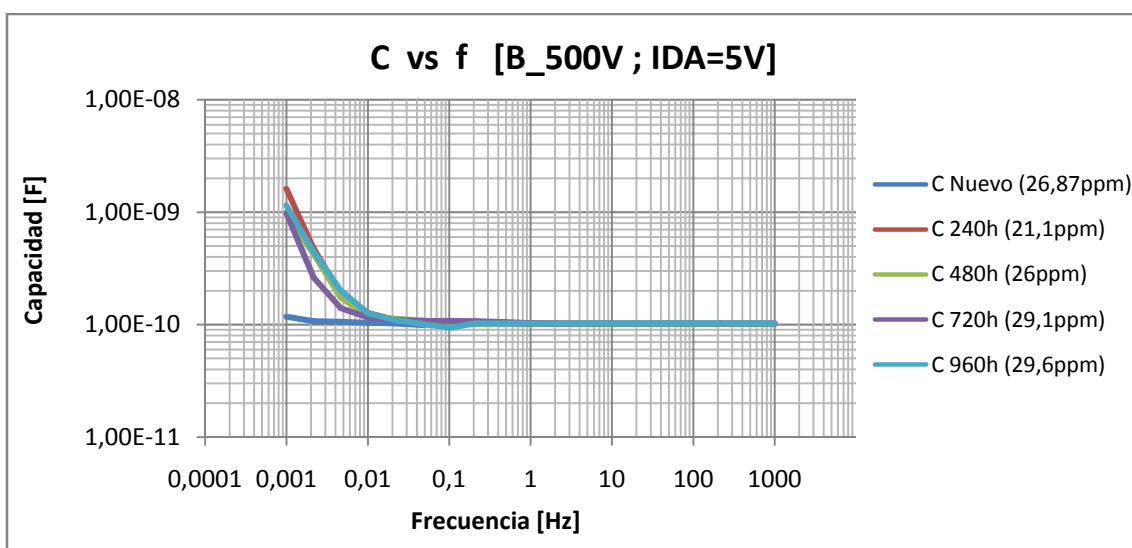


Ilustración 45: Capacidad para un envejecimiento con 0,5kV y tensión IDA de 5V



f	C Nuevo (26,87ppm)	C 240h (21,1ppm)	C 480h (26ppm)	C 720h (29,1ppm)	C 960h (29,6ppm)
1000	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
470,59	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
216,22	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
100	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
46,512	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
21,563	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
10	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
4,6417	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,03E-10
2,1546	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
1	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,03E-10	1,02E-10
0,46417	1,03E-10	1,03E-10	1,02E-10	1,06E-10	1,03E-10
0,21544	1,02E-10	1,04E-10	1,01E-10	1,07E-10	1,03E-10
0,1	1,06E-10	1,05E-10	1,03E-10	1,08E-10	9,38E-11
0,046416	9,91E-11	1,06E-10	1,09E-10	1,08E-10	1,01E-10
0,021544	1,02E-10	1,10E-10	1,13E-10	1,10E-10	1,10E-10
0,0099999	1,04E-10	1,27E-10	1,21E-10	1,16E-10	1,26E-10
0,0046415	1,06E-10	1,90E-10	1,74E-10	1,40E-10	2,01E-10
0,0021543	1,07E-10	4,77E-10	4,22E-10	2,62E-10	4,45E-10
0,00099988	1,18E-10	1,61E-09	9,84E-10	9,81E-10	1,15E-09

Tabla 18: Datos de la C en las muestras de aceite envejecidas a 0,5kV.

Para una observación mas detallada de las muestras de aceite de mayor y menor envejecimiento, se aprecia una confluencia de las curvas en una sola a partir de 0,1Hz, donde permanecen al mismo valor constante que el aceite nuevo.

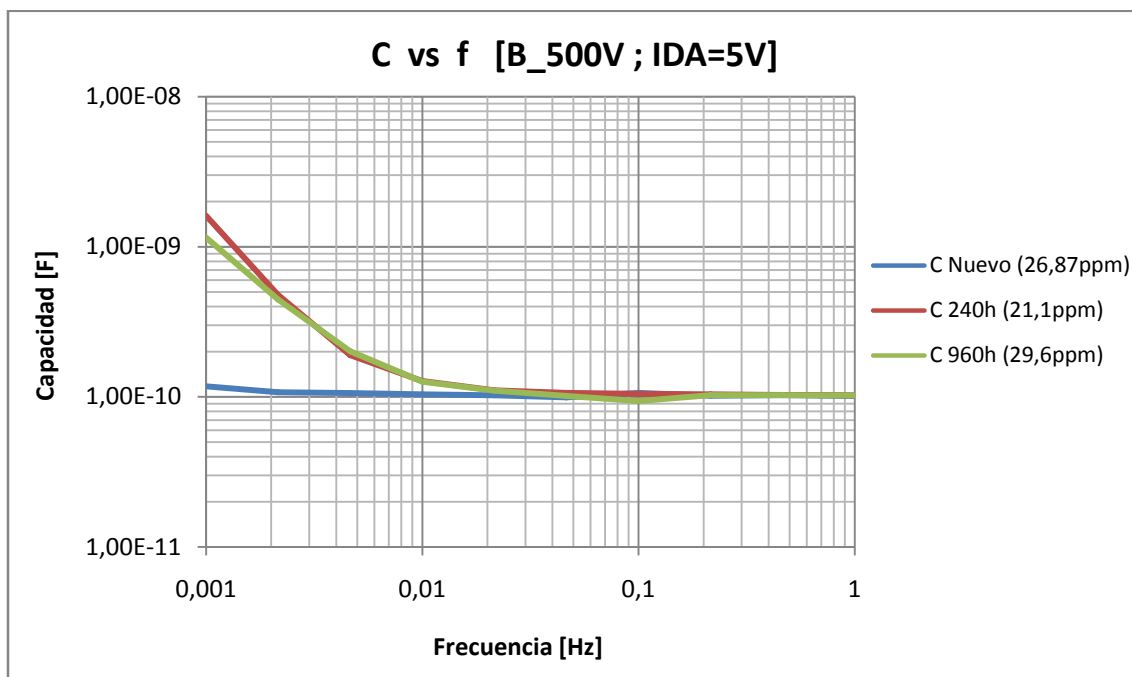


Ilustración 46: C de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 0,5kV.

En la ilustración 47 se grafican los cuatro tipos de aceite analizados para un los distintos envejecimientos sin haber aplicado tensión alguna, así como la curva del aceite sin haberse sometido a ningún proceso de envejecimiento.

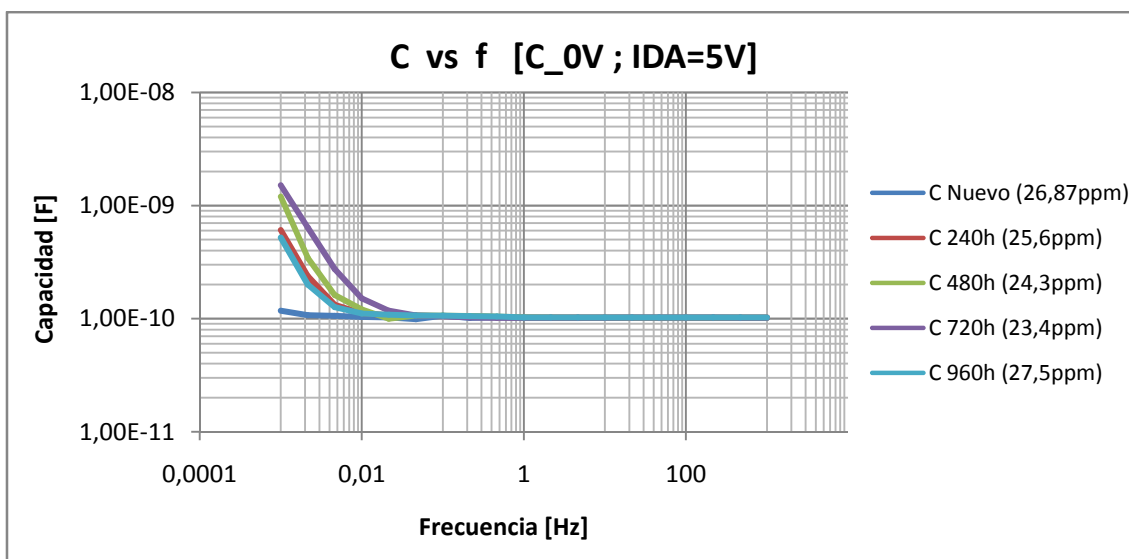


Ilustración 47: Capacidad para un envejecimiento con 0V y tensión IDA de 5V

Las diferencias en la capacidad que presentan la muestra más envejecida con la que menos horas de envejecimiento se le aplicó son mínimas, quedando anuladas a partir de una frecuencia de 10mHz.

f	C Nuevo (26,87ppm)	C 240h (25,6ppm)	C 480h (24,3ppm)	C 720h (23,4ppm)	C 960h (27,5ppm)
1000	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,03E-10
470,59	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,03E-10
216,22	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,03E-10
100	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,03E-10
46,512	1,01E-10	1,03E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,03E-10
21,563	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,03E-10
10	1,01E-10	1,03E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,03E-10
4,6417	1,01E-10	1,03E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,03E-10
2,1546	1,01E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
1	1,01E-10	1,03E-10	1,03E-10	1,02E-10	1,03E-10
0,46417	1,03E-10	1,04E-10	1,04E-10	1,02E-10	1,05E-10
0,21544	1,02E-10	1,05E-10	1,06E-10	1,03E-10	1,05E-10
0,1	1,06E-10	1,06E-10	1,06E-10	1,05E-10	1,06E-10
0,046416	9,91E-11	1,06E-10	1,07E-10	1,07E-10	1,07E-10
0,021544	1,02E-10	1,07E-10	9,99E-11	1,18E-10	1,08E-10
0,0099999	1,04E-10	1,12E-10	1,21E-10	1,51E-10	1,11E-10
0,0046415	1,06E-10	1,33E-10	1,62E-10	2,75E-10	1,26E-10
0,0021543	1,07E-10	2,38E-10	3,45E-10	6,39E-10	2,00E-10
0,00099988	1,18E-10	6,08E-10	1,20E-09	1,51E-09	5,23E-10

Tabla 19: Datos de la C en las muestras de aceite envejecidas a 0V.



Para muy baja frecuencia se ha podido apreciar perfectamente el efecto que la humedad provoca en la pérdida de capacitancia de las muestras del aceite aislante de los transformadores, produciéndose una pérdida de capacidad conforme aumenta las ppm de humedad. Esta disminución de C también se produce con frecuencias más altas.

El aceite nuevo, sin aplicarse ningún método de envejecimiento, posee una capacidad constante y uniforme a lo largo de todo el rango de frecuencias.

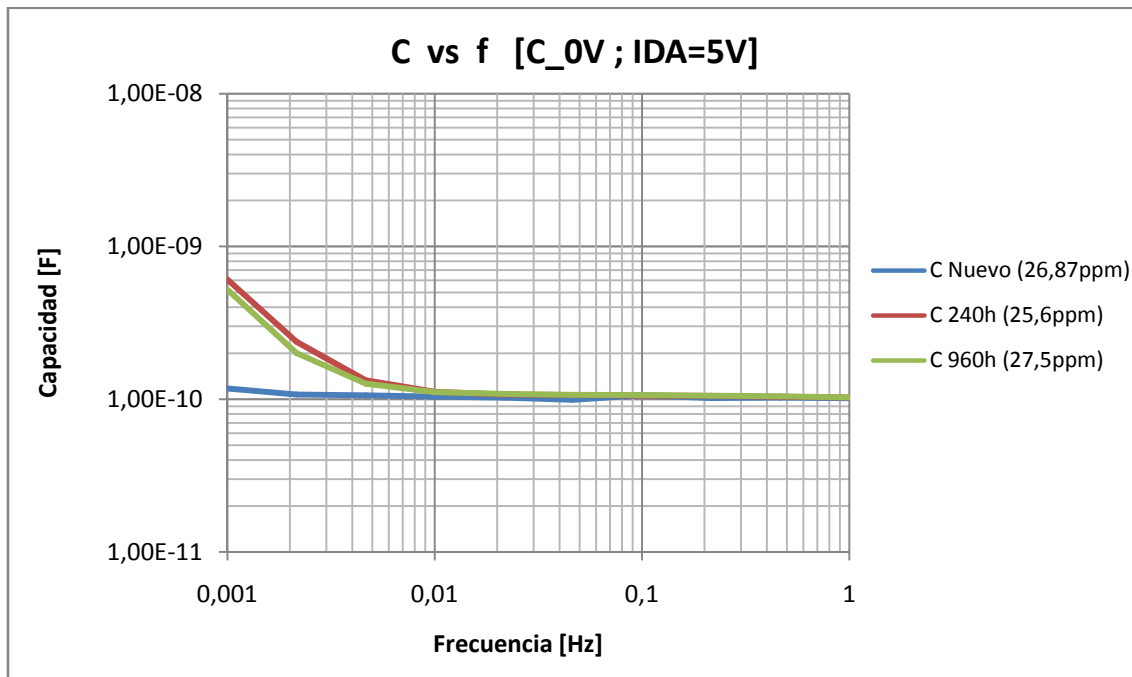


Ilustración 48: C de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 0V.

Para este nivel de envejecimiento, se han apreciado los mismos comportamientos de las curvas a lo largo de la frecuencia, que en los caso de las muestras envejecidas aplicando tensión en el aceite.

El fenómeno detectados en todas las muestras analizadas es el mismo, pues en todas se observa cómo es la muestra con menor porcentaje de humedad, la que posee una mayor capacidad. Por lo que podemos concluir que todos los niveles de tensión tienen la misma tendencia a aumentar su capacidad conforme disminuye el nivel de agua existente en el aceite.

6.2.1. Efecto de la tensión de medición en la capacidad.

Se analiza la posible influencia que la tensión de medición pueda tener sobre la obtención de los datos, y a su vez, si afecta sobre el comportamiento de la capacidad a lo largo de la frecuencia.

Se observa en las gráficas 49 y 50, pertenecientes a una tensión de envejecimiento de 1kV, como para la tensión de medición de 5V existe una mayor sensibilidad puesto que se aprecian mayores diferencias en los distintos tipos de aceite,

mientras que para 140V, las curvas son mas uniformes, coincidiendo los valores de algunas de ellas.

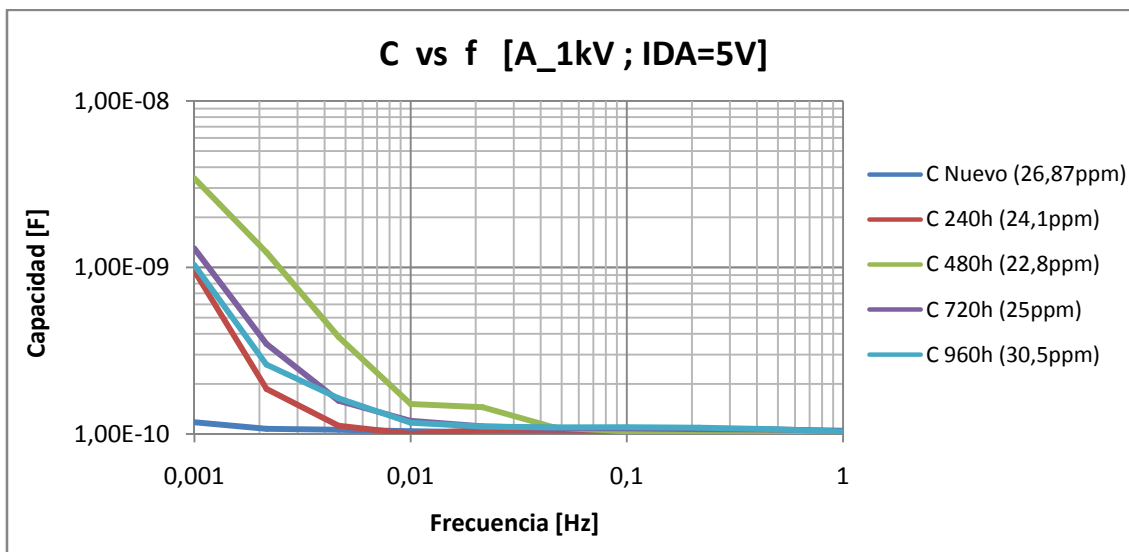


Ilustración 49: Capacidad para un envejecimiento con 1kV y tensión IDA de 5V

En esta imagen se aprecia casi la coincidencia de capacitancia que poseen a muy baja frecuencia todas las muestras tratadas, y es el aceite nuevo el que posee un valor mucho más pequeño que el resto.

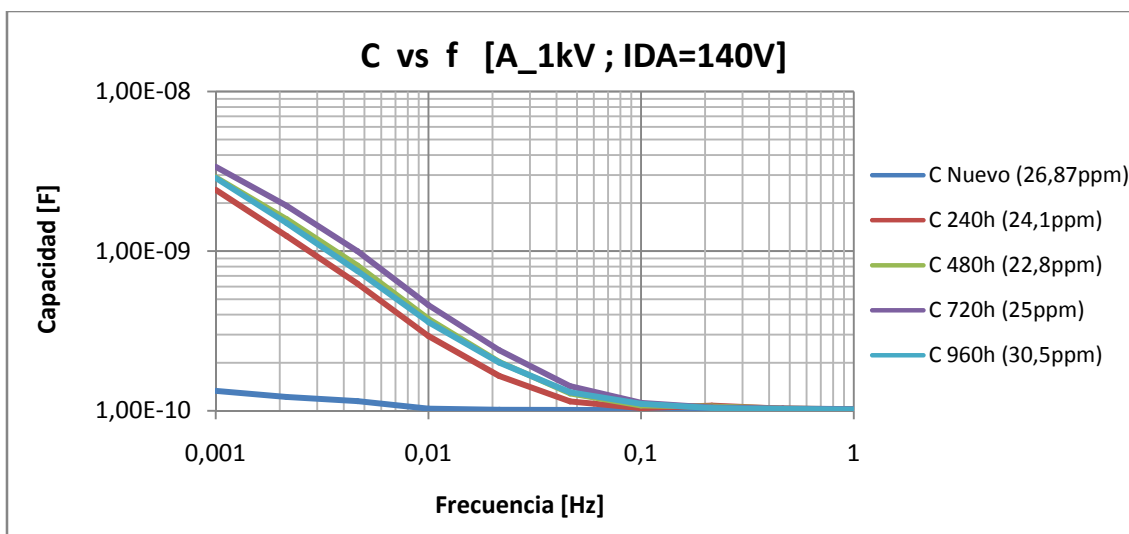


Ilustración 50: Capacidad para un envejecimiento con 1kV y tensión IDA de 140V

A partir de una frecuencia $f=0,1\text{Hz}$ todas las muestras, independientemente de la tensión a la que se haya realizado la medición, se comportan de manera similar en cuanto a la capacidad se refiere, sin embargo, en el rango de frecuencias de 0,01-0,1Hz, se puede ver como es mayor la capacidad para la medición realizada a mayor tensión.

Las siguientes ilustraciones, 51 y 52, corresponden a las muestras de aceite envejecidas con una tensión de 500V

La grafica correspondiente al envejecimiento de 720 horas denota una humedad muy superior al resto, lo que se traduce en un desplazamiento significativo con respecto al resto de muestras analizadas, mientras que es la curva con menor grado de envejecimiento la que mayor capacidad posee y un menor porcentaje de humedad.

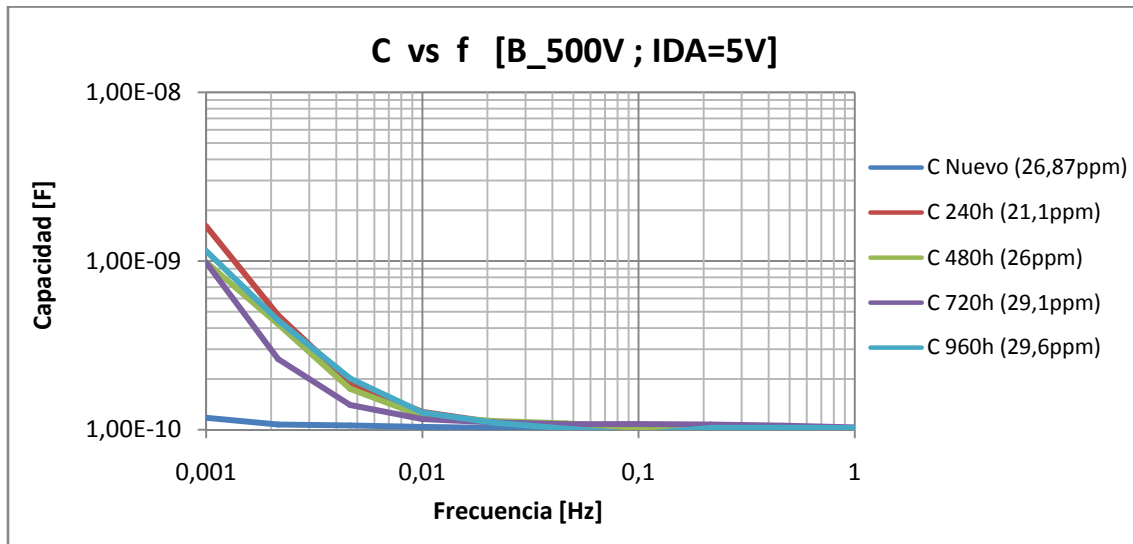


Ilustración 51: Capacidad para un envejecimiento con 0,5kV y tensión IDA de 5V

La pendiente de las graficas de las muestras es menor para una tensión de medida de 140V, con el consiguiente alargamiento en su trazo, hasta concluir en 0.1Hz, lugar donde confluyen todas para continuar con una capacidad constante.

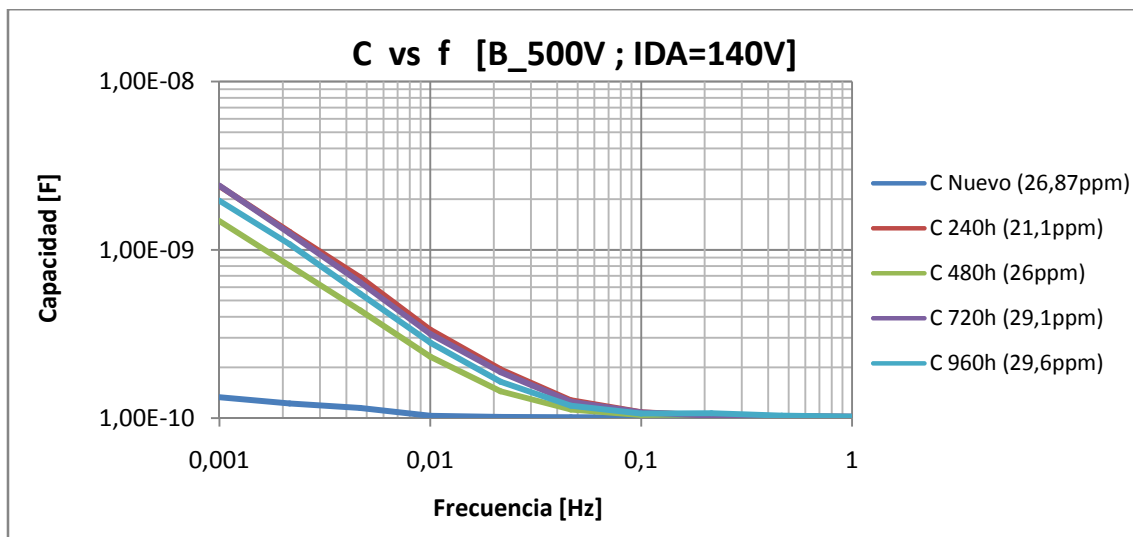


Ilustración 52: Capacidad para un envejecimiento con 0,5kV y tensión IDA de 140V

Para 140V las muestras que presentan una mayor capacidad son aquellas que tienen un menor contenido de humedad.

Analizamos las graficas sin haber sido sometidas a tensión en su envejecimiento.

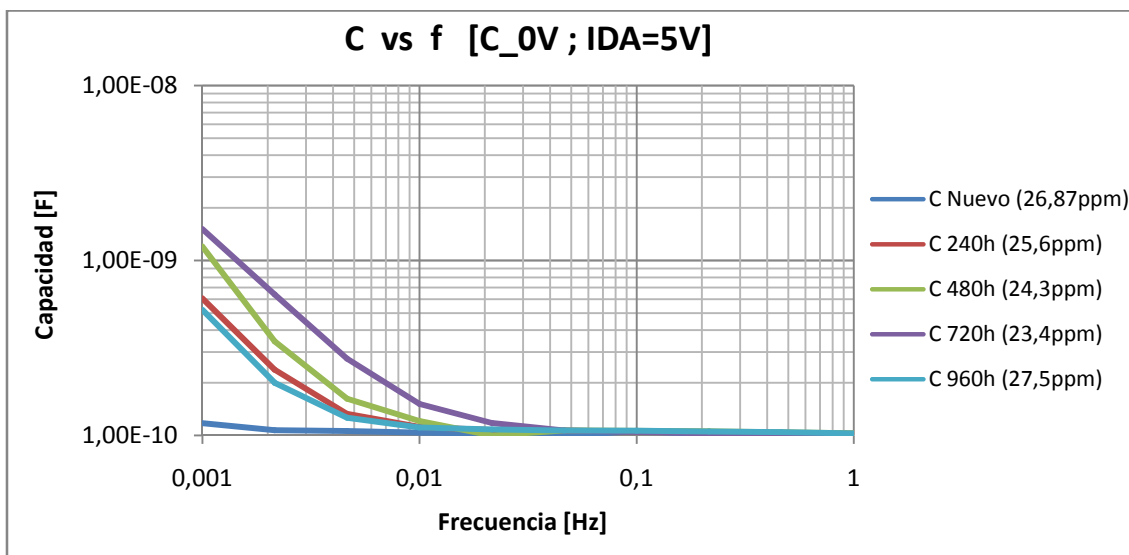


Ilustración 53: Capacidad para un envejecimiento con 0V y tensión IDA de 5V

Es curioso comprobar cómo se produce un leve aumento en la capacitancia para la muestra de 720 horas de envejecimiento, y cuyo nivel de humedad es menor que el resto de gráficas.

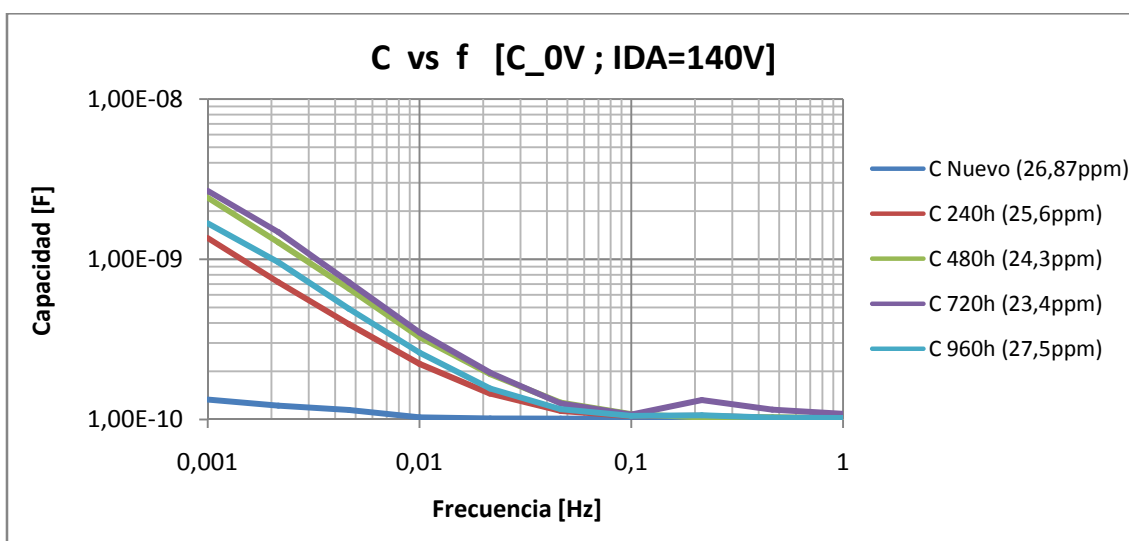


Ilustración 54: Capacidad para un envejecimiento con 0V y tensión IDA de 140V

Como en los casos anteriores, se denotan los mismos efectos en todas las gráficas, por un lado se comprueba que las capacidades no comienzan a diferenciarse a partir de una frecuencia de 0,1Hz en 140V, a diferencia del caso de 5V donde no se aprecian diferencias ente los tipos de aceites a partir de una frecuencia menor ($f=0,01\text{Hz}$).

Se observa en todos los casos cómo para una tensión de medición de 140V, las muestras que presentan mayor capacidad son aquellas que tienen un mayor contenido de humedad.

6.2.2. Variación de la C en función del tiempo de envejecimiento

En la tabla 20 se muestran los datos de la capacitancia de las distintas muestras de aceite, recogidos para las tres tensiones de envejecimiento y para tres valores de frecuencia distintos, con el fin de comparar su evolución con el tiempo de envejecimiento.

	A_1kV 1mHz	B_500V 1mHz	C_0V 1mHz	A_1kV 1Hz	B_500V 1Hz	C_0V 1Hz	A_1kV 50Hz	B_500V 50Hz	C_0V 50Hz
0h.	1,18E-10	1,18E-10	1,18E-10	1,0142E-10	1,0142E-10	1,0142E-10	1,01E-10	1,01E-10	1,01E-10
240h.	9,53E-10	1,61E-09	6,08E-10	1,0361E-10	1,0227E-10	1,0260E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,03E-10
480h.	3,43E-09	9,84E-10	1,20E-09	1,0364E-10	1,0221E-10	1,0306E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
720h.	1,30E-09	9,81E-10	1,51E-09	1,0450E-10	1,0308E-10	1,0180E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,02E-10
960h.	1,04E-09	1,15E-09	5,23E-10	1,0348E-10	1,0216E-10	1,0272E-10	1,02E-10	1,02E-10	1,03E-10

Tabla 20: Capacidad en las muestras de aceite según su envejecimiento.

Si bien, la frecuencia que aparece es de 50Hz, no es exactamente este valor. Su valor correcto es el de 46,512Hz que es para la que el IDA 200 ha proporcionado los datos. Es interesante recoger el comportamiento a la frecuencia de red, ya que la mayoría de manuales obligan a utilizar esta frecuencia como referencia.

A continuación, en las ilustraciones 55, 56 y 57 se observan graficados los valores de la tabla anterior.

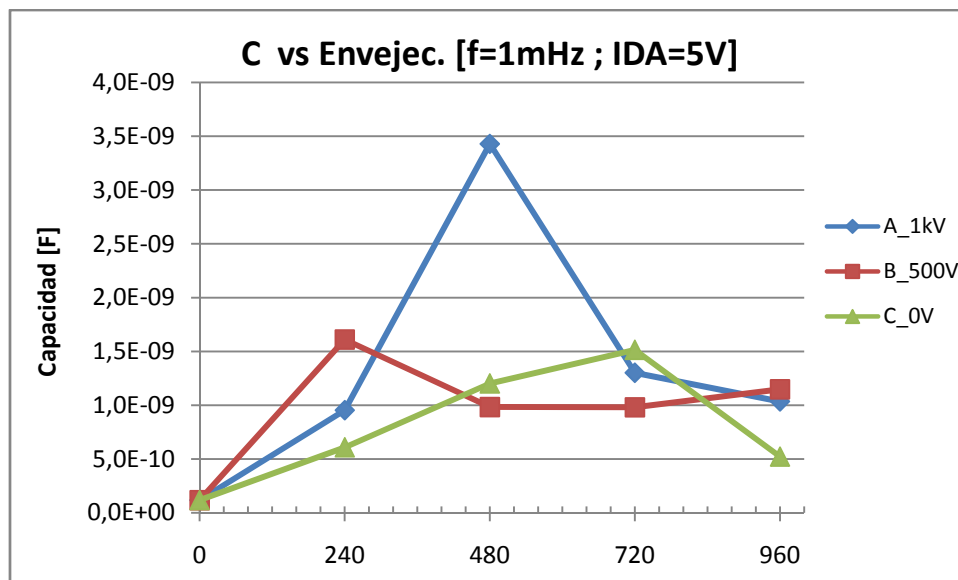


Ilustración 55: Capacidad según el envejecimiento para f=1mHz

Se aprecia un aumento continuo en la capacitancia conforme aumentamos el tiempo de envejecimiento de las muestras de aceite.

Para el valor de 480h correspondiente a la muestra envejecida a 1kV se produce un punto de dispersión, debido a un posible fallo en la medición del aparato.

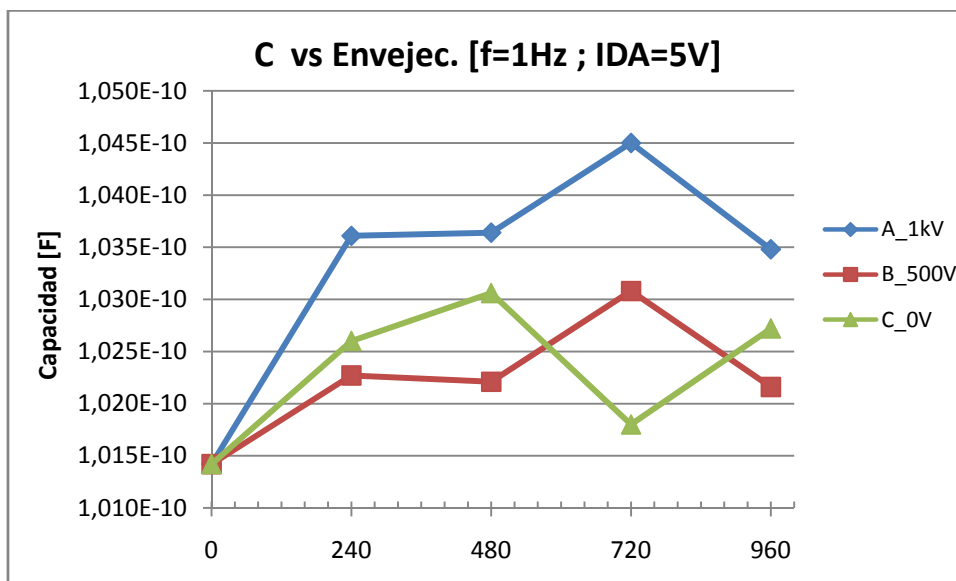


Ilustración 56: Capacidad según el envejecimiento para f=1Hz

Para la frecuencia de 46,512Hz, se observa en la curva C, y en el punto de 240 horas de envejecimiento se produce otra disparidad, en este punto es probable que la precisión del aparato no haya sido muy buena, si bien, no afecta al comportamiento general de las graficas.

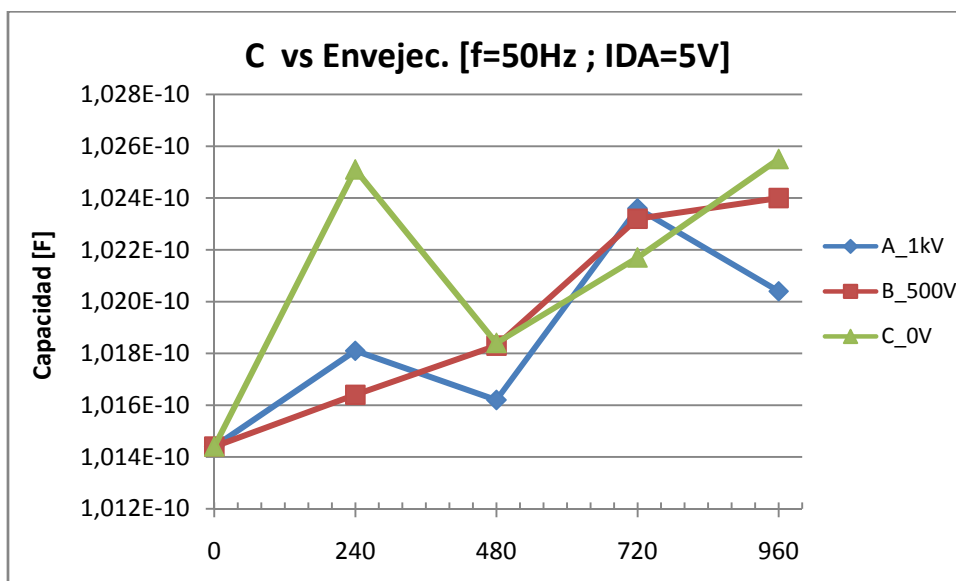


Ilustración 57: Capacidad según el envejecimiento para f=50Hz

En todos los casos se produce la misma tendencia en el comportamiento de las muestras a lo largo de su envejecimiento, una subida de las curvas que se puede traducir como un aumento de la capacitancia conforme son mayores las horas de envejecimiento a las que ha sido tratado el aceite.



6.3. Mediciones de la conductividad (σ)

Como en los casos anteriores, se estudia el comportamiento de las gráficas obtenidas a partir de los datos recogidos en la tabla. Analicemos el comportamiento de la conductividad para una tensión de envejecimiento de 1000V y 120°C de temperatura.

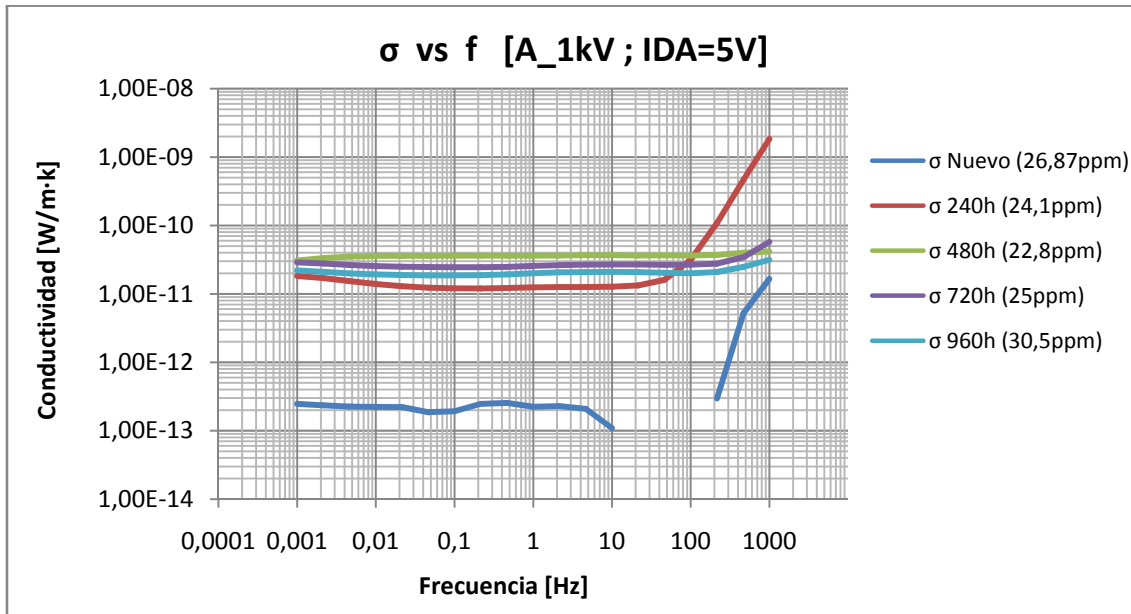


Ilustración 58: Conductividad con envejecimiento de 1kV y tensión IDA de 5V

f [Hz]	σ Nuevo (26,87ppm)	σ 240h (24,1ppm)	σ 480h (22,8ppm)	σ 720h (25ppm)	σ 960h (30,5ppm)
1000	1,66E-11	1,83E-09	4,16E-11	5,77E-11	3,14E-11
470,59	5,23E-12	4,68E-10	3,99E-11	3,42E-11	2,48E-11
216,22	2,96E-13	1,09E-10	3,73E-11	2,77E-11	2,09E-11
100	-7,02E-13	3,14E-11	3,64E-11	2,68E-11	2,00E-11
46,512	2,35E-14	1,60E-11	3,67E-11	2,66E-11	2,03E-11
21,563	-2,90E-14	1,33E-11	3,65E-11	2,69E-11	2,08E-11
10	1,09E-13	1,27E-11	3,67E-11	2,69E-11	2,10E-11
4,6417	2,09E-13	1,26E-11	3,67E-11	2,68E-11	2,08E-11
2,1546	2,29E-13	1,26E-11	3,64E-11	2,64E-11	2,07E-11
1	2,24E-13	1,25E-11	3,62E-11	2,56E-11	2,01E-11
0,46417	2,55E-13	1,22E-11	3,62E-11	2,49E-11	1,92E-11
0,21544	2,48E-13	1,20E-11	3,63E-11	2,46E-11	1,88E-11
0,1	1,93E-13	1,21E-11	3,62E-11	2,45E-11	1,86E-11
0,046416	1,86E-13	1,24E-11	3,61E-11	2,47E-11	1,87E-11
0,021544	2,22E-13	1,29E-11	3,59E-11	2,50E-11	1,89E-11
0,0099999	2,23E-13	1,39E-11	3,59E-11	2,55E-11	1,93E-11
0,0046415	2,26E-13	1,53E-11	3,50E-11	2,65E-11	1,99E-11
0,0021543	2,35E-13	1,70E-11	3,34E-11	2,79E-11	2,10E-11
0,00099988	2,47E-13	1,83E-11	3,08E-11	2,88E-11	2,20E-11

Tabla 21: Conductividad de las muestras de aceite envejecidas a 1kV.

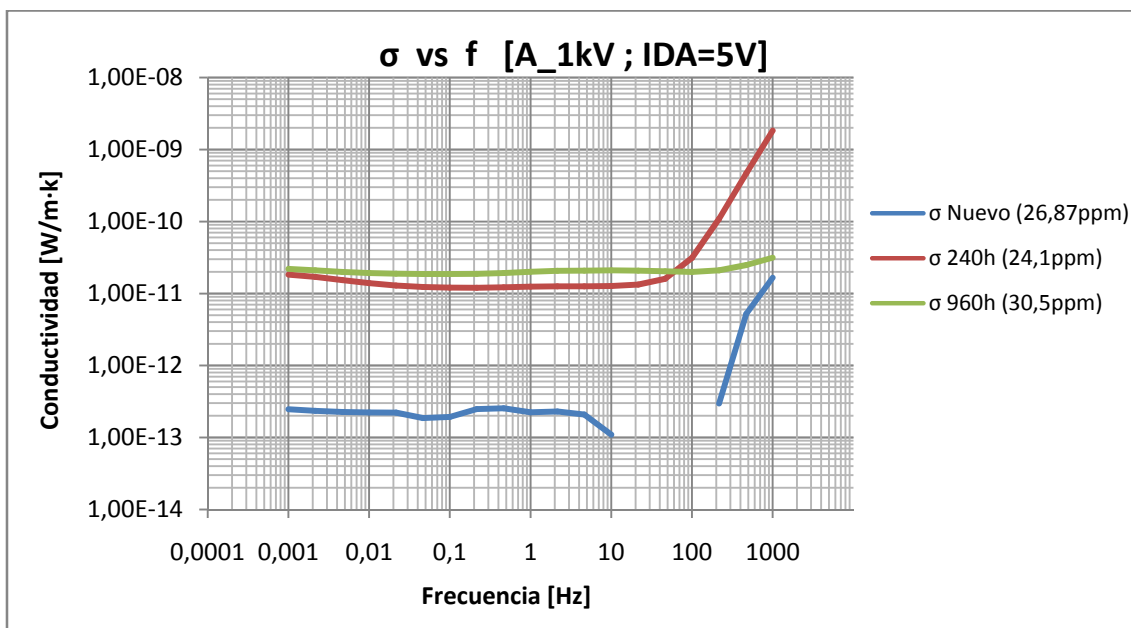


Ilustración 59: σ de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 1kV.

Se puede observar que a muy baja frecuencia, el valor de la conductividad es similar en todas las muestras realizadas a 1kV de tensión de envejecimiento, aumentando la diferencia entre las curvas conforme aumenta la frecuencia.

A continuación, se estudia la evolución de la conductividad para el aceite tratado con 500V en su envejecimiento y habiéndose realizado la toma de datos a mediante una tensión de 5V entre bornes del aparato.

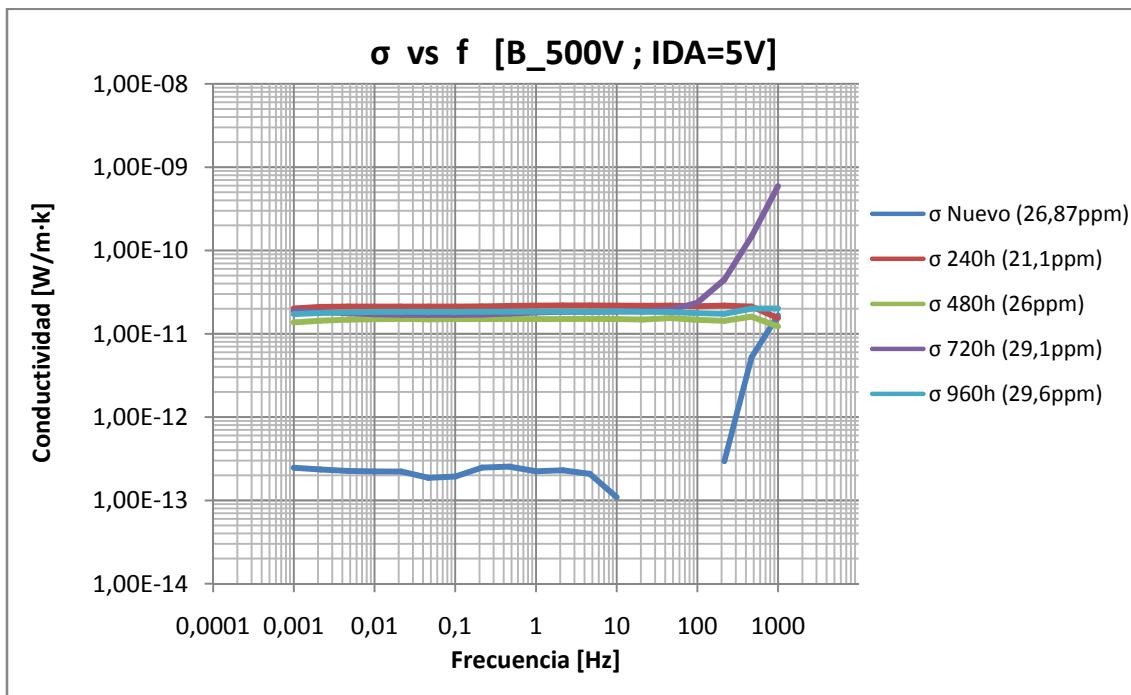


Ilustración 60: Conductividad con envejecimiento de 0,5kV y tensión IDA de 5V



f	σ Nuevo (26,87ppm)	σ 240h (21,1ppm)	σ 480h (26ppm)	σ 720h (29,1ppm)	σ 960h (29,6ppm)
1000	1,66E-11	1,54E-11	1,22E-11	5,92E-10	2,01E-11
470,59	5,23E-12	2,12E-11	1,60E-11	1,48E-10	2,00E-11
216,22	2,96E-13	2,17E-11	1,43E-11	4,46E-11	1,74E-11
100	-7,02E-13	2,14E-11	1,47E-11	2,35E-11	1,77E-11
46,512	2,35E-14	2,17E-11	1,54E-11	1,94E-11	1,82E-11
21,563	-2,90E-14	2,17E-11	1,48E-11	1,87E-11	1,83E-11
10	1,09E-13	2,18E-11	1,50E-11	1,85E-11	1,86E-11
4,6417	2,09E-13	2,19E-11	1,51E-11	1,84E-11	1,83E-11
2,1546	2,29E-13	2,19E-11	1,50E-11	1,83E-11	1,85E-11
1	2,24E-13	2,18E-11	1,50E-11	1,80E-11	1,84E-11
0,46417	2,55E-13	2,15E-11	1,50E-11	1,74E-11	1,84E-11
0,21544	2,48E-13	2,13E-11	1,50E-11	1,70E-11	1,84E-11
0,1	1,93E-13	2,12E-11	1,50E-11	1,69E-11	1,84E-11
0,046416	1,86E-13	2,12E-11	1,49E-11	1,69E-11	1,83E-11
0,021544	2,22E-13	2,12E-11	1,51E-11	1,70E-11	1,83E-11
0,0099999	2,23E-13	2,12E-11	1,49E-11	1,72E-11	1,83E-11
0,0046415	2,26E-13	2,12E-11	1,48E-11	1,76E-11	1,81E-11
0,0021543	2,35E-13	2,10E-11	1,44E-11	1,82E-11	1,78E-11
0,00099988	2,47E-13	2,01E-11	1,37E-11	1,88E-11	1,72E-11

Tabla 22: Conductividad de las muestras de aceite envejecidas a 0,5kV.

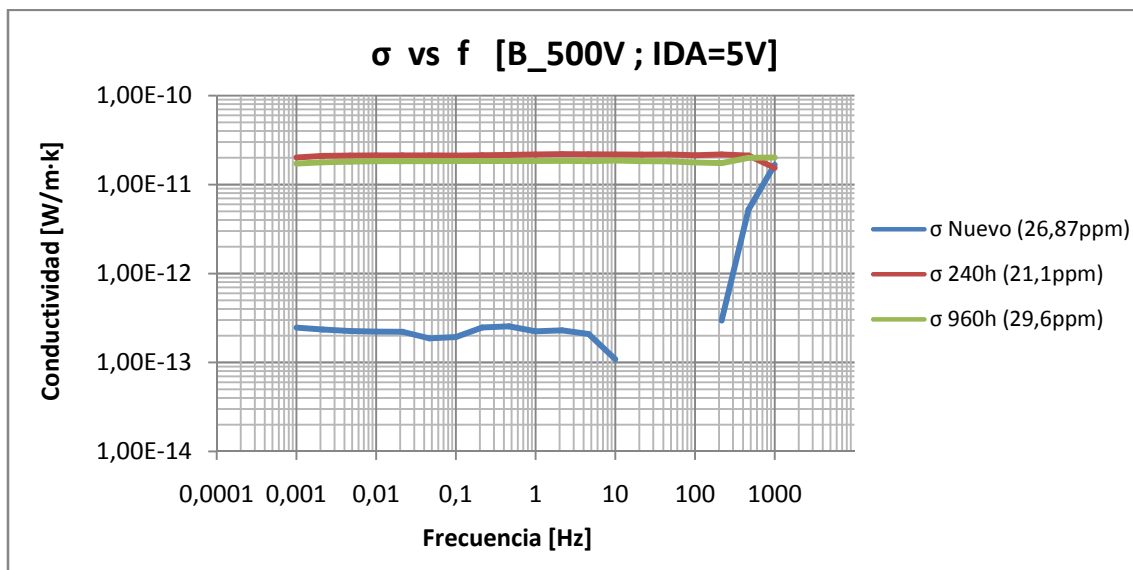


Ilustración 61: σ de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 0,5kV

La grafica ampliada permite comprobar cómo no aumenta significativamente la conductividad al disminuir el porcentaje de humedad de las muestras. A su vez, el valor correspondiente para una frecuencia de 1kHz es prácticamente el mismo para todas las muestras de aceite incluido el aceite nuevo sin tratar.



Finalmente se ha estudiado el comportamiento de la conductividad para todas las muestras pero sin haberse realizado un tratamiento de envejecimiento por suministro de tensión. En las ilustraciones 62 y 63 se observan las muestras envejecidas simplemente con una temperatura de 120°C

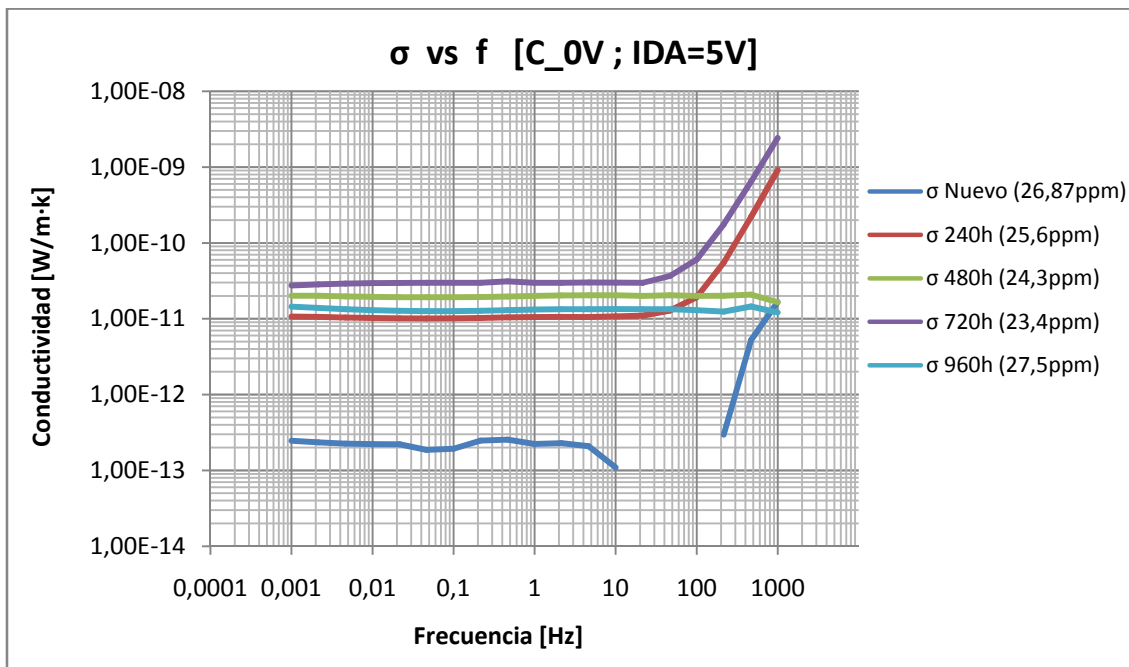


Ilustración 62: : Conductividad con envejecimiento de 0V y tensión IDA de 5V

f	σ Nuevo (26,87ppm)	σ 240h (25,6ppm)	σ 480h (24,3ppm)	σ 720h (23,4ppm)	σ 960h (27,5ppm)
1000	1,66E-11	9,09E-10	1,66E-11	2,43E-09	1,21E-11
470,59	5,23E-12	2,21E-10	2,08E-11	6,45E-10	1,45E-11
216,22	2,96E-13	5,51E-11	2,01E-11	1,76E-10	1,24E-11
100	-7,02E-13	1,93E-11	2,00E-11	6,03E-11	1,30E-11
46,512	2,35E-14	1,28E-11	2,04E-11	3,66E-11	1,34E-11
21,563	-2,90E-14	1,10E-11	2,01E-11	2,98E-11	1,34E-11
10	1,09E-13	1,07E-11	2,04E-11	3,00E-11	1,34E-11
4,6417	2,09E-13	1,06E-11	2,04E-11	3,02E-11	1,34E-11
2,1546	2,29E-13	1,06E-11	2,03E-11	2,99E-11	1,34E-11
1	2,24E-13	1,06E-11	2,01E-11	2,98E-11	1,32E-11
0,46417	2,55E-13	1,04E-11	1,97E-11	3,11E-11	1,30E-11
0,21544	2,48E-13	1,02E-11	1,93E-11	2,99E-11	1,27E-11
0,1	1,93E-13	1,01E-11	1,92E-11	2,98E-11	1,26E-11
0,046416	1,86E-13	1,01E-11	1,92E-11	2,98E-11	1,26E-11
0,021544	2,22E-13	1,01E-11	1,93E-11	2,97E-11	1,28E-11
0,0099999	2,23E-13	1,03E-11	1,95E-11	2,95E-11	1,30E-11
0,0046415	2,26E-13	1,04E-11	1,98E-11	2,92E-11	1,34E-11
0,0021543	2,35E-13	1,06E-11	2,01E-11	2,85E-11	1,39E-11
0,00099988	2,47E-13	1,07E-11	2,02E-11	2,74E-11	1,44E-11

Tabla 23: Conductividad del aceite envejecido sin tensión.

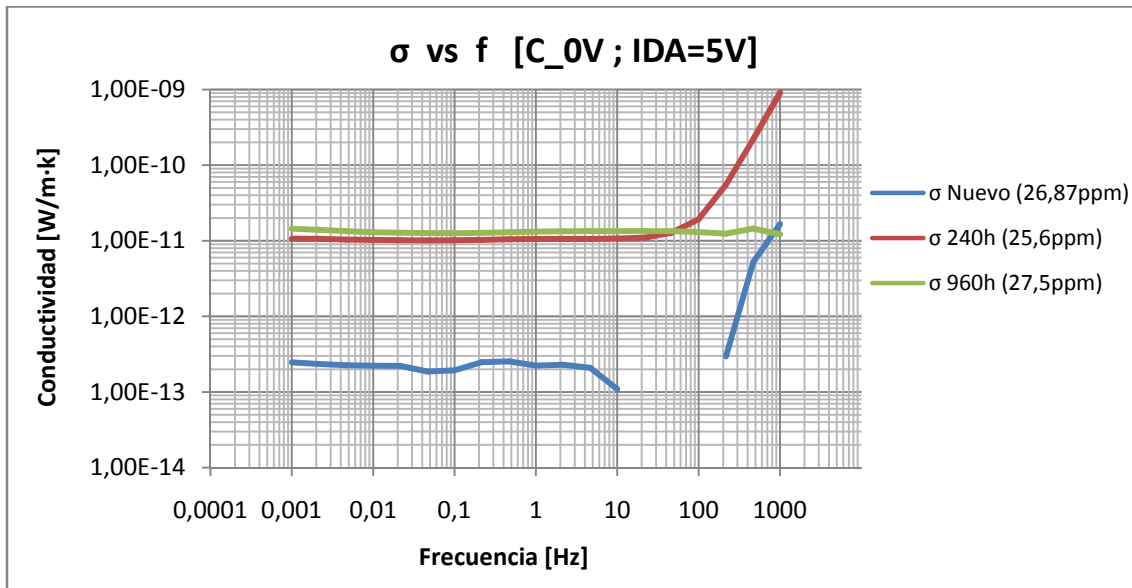


Ilustración 63: σ de las curvas con menor y mayor envejecimiento a 0V

Se puede deducir que cuando ninguna tensión ha sido aplicada en el proceso de envejecimiento, se obtienen unas mayores diferencias entre los valores de conductividad de los diferentes aceites, y a lo largo de la frecuencia.

Al igual que en los análisis anteriores producidos a otros niveles de tensión en su proceso de envejecimiento, se puede afirmar que para bajas frecuencias se observa una menor diferencia entre los valores de conductividad correspondientes a las muestras.

6.3.1. Efecto de la tensión de medición en la σ de las muestras

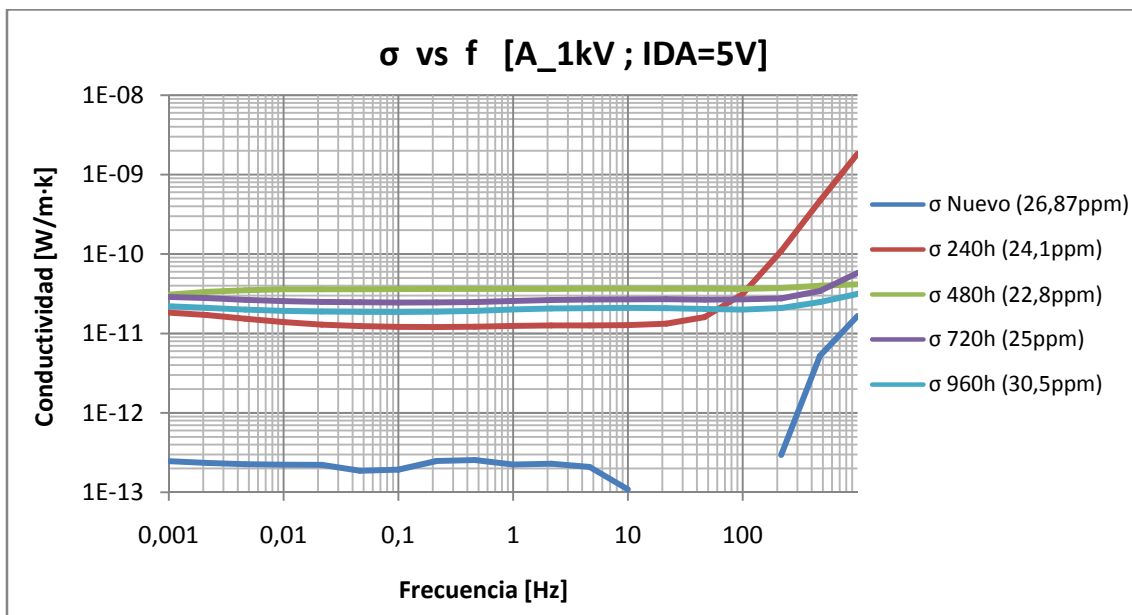


Ilustración 64: Conductividad para un envejecimiento con 1kV y tensión IDA de 5V

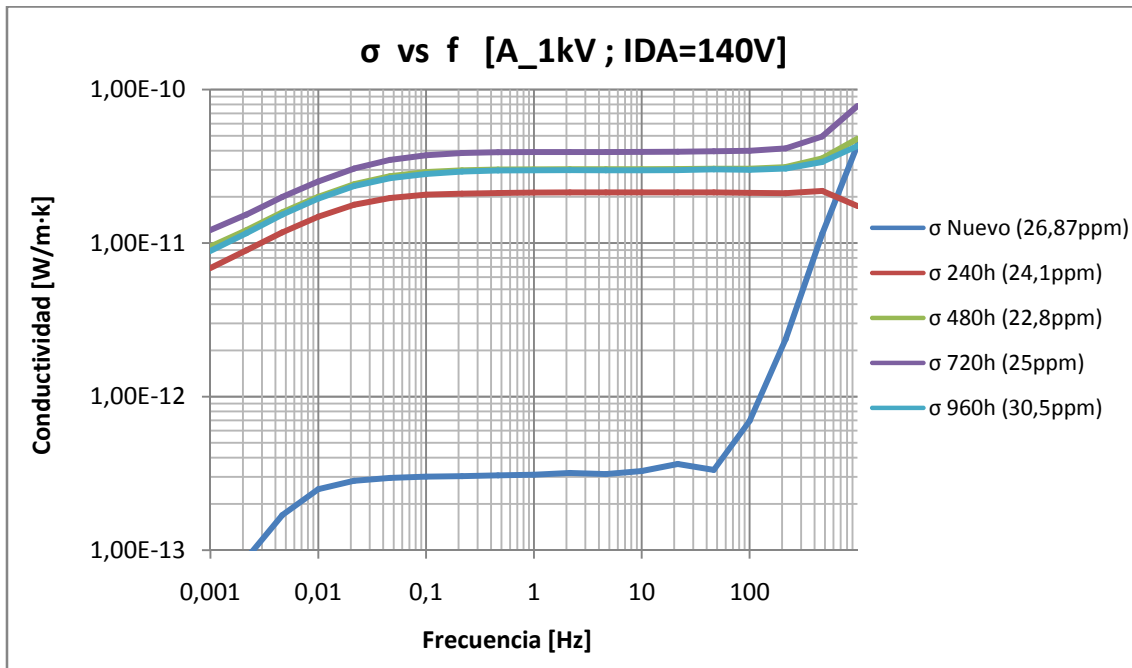


Ilustración 65: Conductividad con envejecimiento de 1kV y tensión IDA de 140V

Se demuestra la existencia de una mayor sensibilidad del aparato de medición con una tensión de 140V ya que se aprecia un aumento en los valores de conductividad, hecho que con una tensión de 5V no se llega a apreciar.

A partir de una frecuencia de 0,01Hz para la tensión de 5V y de 0.1Hz en la de 140V no se detectan variaciones de conductividad entre las muestras recogidas, por lo que todas las gráficas permanecen continuas y constantes a valores mayores de f .

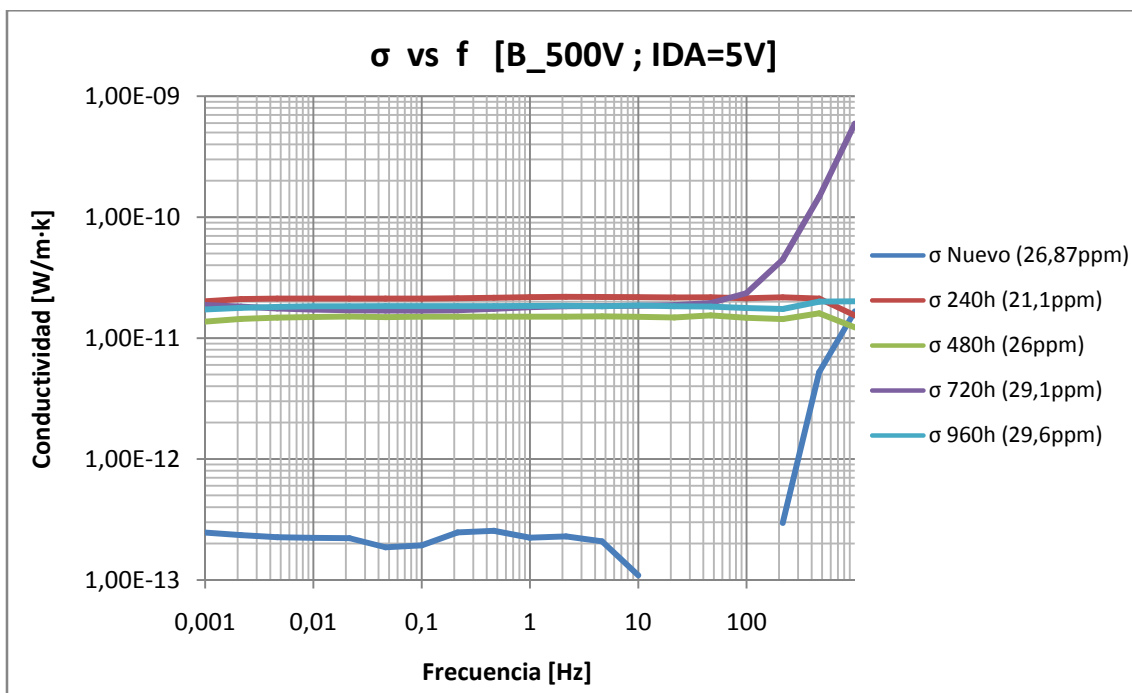


Ilustración 66: Conductividad del aceite con 0,5kV y tensión IDA de 5V

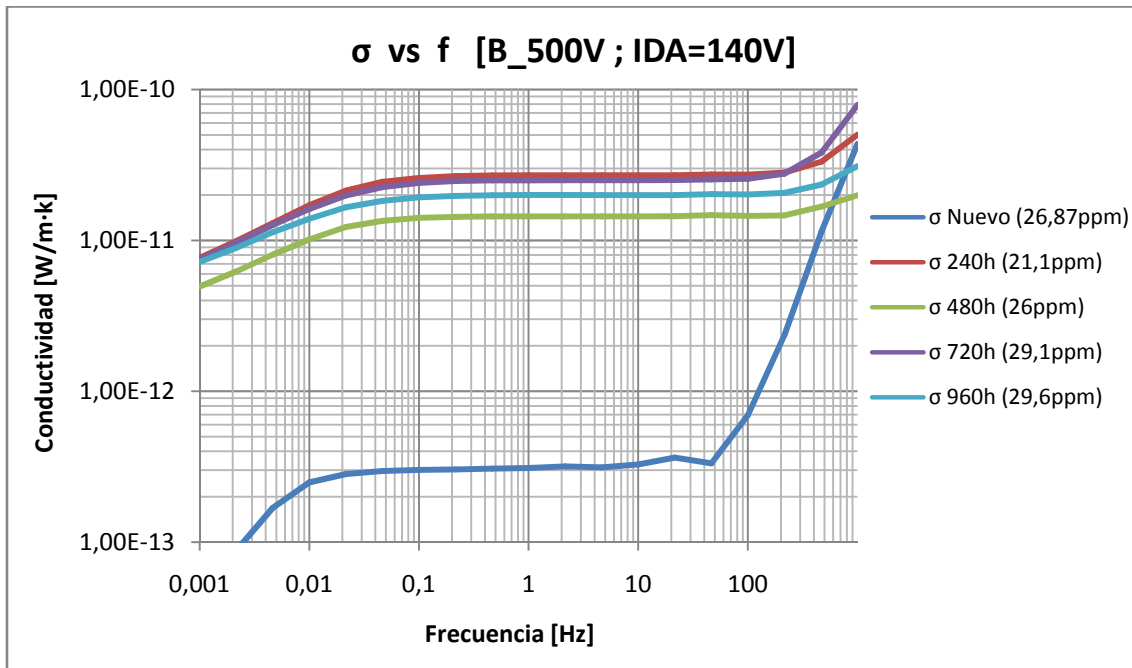


Ilustración 67: Conductividad con envejecimiento a 0,5kV y tensión IDA de 140V

En el caso de las muestras recogidas con un envejecimiento de 500V, se producen los mismos efectos que en las envejecidas con 1kV de tensión.

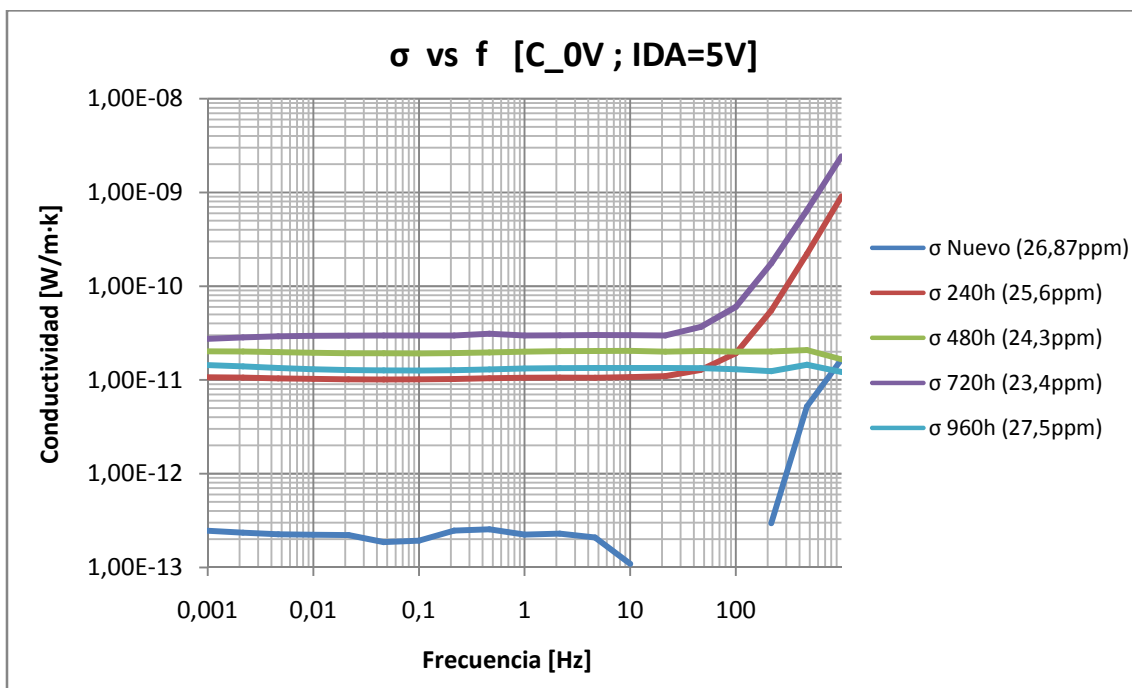


Ilustración 68: Conductividad para un envejecimiento con 0V y tensión IDA de 5V

Al igual que para el caso anterior, con una tensión de medición de 5V no se llega a obtener el valor de la conductividad para el rango de frecuencias de 10Hz-200Hz, esto es debido a la escasa precisión de medida con corrientes bajas, por lo que el IDA muestra un valor negativo de conductividad en su medición.

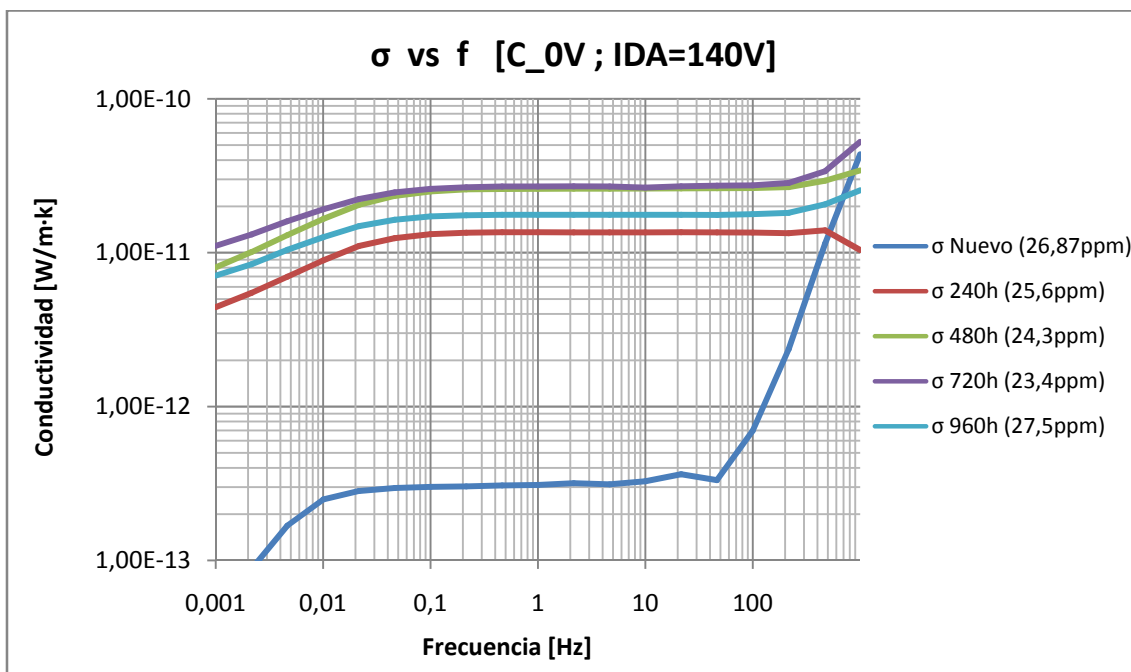


Ilustración 69: σ del aceite envejecido a 0V y tensión IDA de 140V

Para una tensión de envejecimiento de 0V se muestra de una forma más clara que en cualquiera de los casos anteriores, la relación existente entre el grado de envejecimiento del aceite y el porcentaje de humedad existente en el aceite.

Se puede concluir que cuanto menor es la frecuencia, mejor se aprecian las diferencias en los valores de conductividad, además, es para una tensión de medición de 140V donde más exactitud se obtiene de los datos.

6.3.2. Variación de la σ en función del tiempo de envejecimiento

En este punto, y a partir de la tabla de datos 24, podemos contemplar la evolución de la conductividad en las distintas muestras de aceite analizadas, y su variación en función del tipo de tensión a las que se las ha sometido en el proceso de envejecimiento y para tres frecuencias distintas.

	A_1kV 1mHz	B_500V 1mHz	C_0V 1mHz	A_1kV 1Hz	B_500V 1Hz	C_0V 1Hz	A_1kV 50Hz	B_500V 50Hz	C_0V 50Hz
0h.	2,47E-13	2,47E-13	2,47E-13	2,2388E-13	2,2388E-13	2,2388E-13	2,35E-14	2,35E-14	2,35E-14
240h.	1,83E-11	2,01E-11	1,07E-11	1,2451E-11	2,18E-11	1,06E-11	1,60E-11	2,17E-11	1,28E-11
480h.	3,08E-11	1,37E-11	2,02E-11	3,6244E-11	1,50E-11	2,01E-11	3,67E-11	1,54E-11	2,04E-11
720h.	2,88E-11	1,88E-11	2,74E-11	2,56E-11	1,80E-11	2,98E-11	2,66E-11	1,94E-11	3,66E-11
960h.	2,20E-11	1,72E-11	1,44E-11	2,01E-11	1,84E-11	1,32E-11	2,03E-11	1,82E-11	1,34E-11

Tabla 24: Conductividad de las muestras de aceite según su envejecimiento

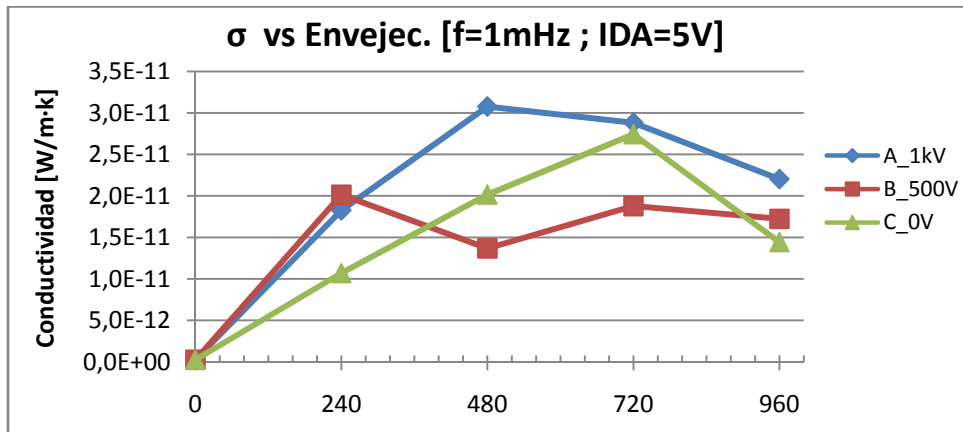


Ilustración 70: Conductividad según el envejecimiento para f=1mHz

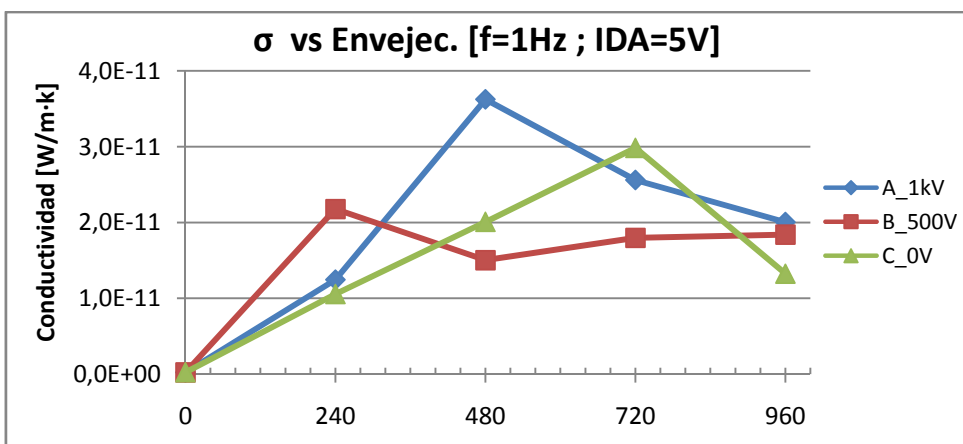


Ilustración 71: Conductividad según el envejecimiento para f=1Hz

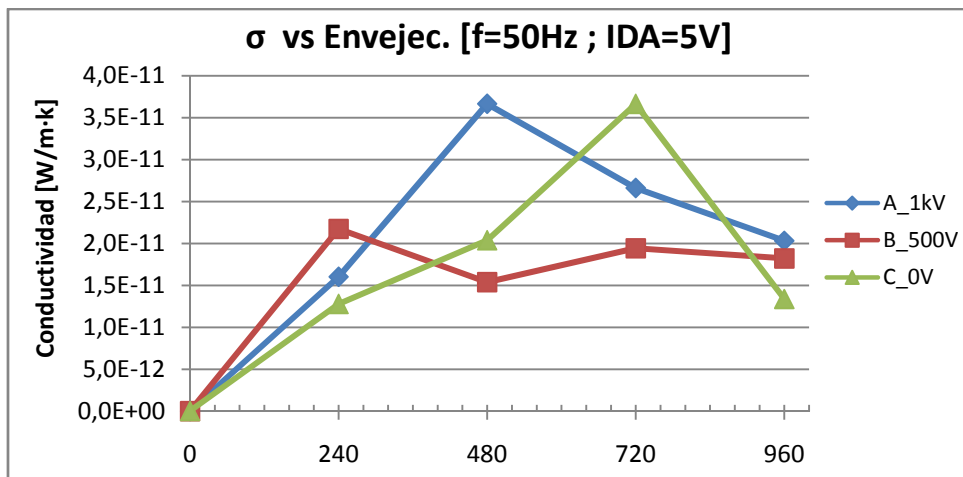


Ilustración 72: Conductividad según el envejecimiento para f=50Hz

En todas las gráficas se aprecia el mismo efecto, correspondiente a un aumento conforme su envejecimiento es mayor, acabando finalmente en similar valor de conductividad (del orden de 2s/m), siendo ligeramente mayor la conductividad de un aceite conforme mayor es la tensión a la que ha sido envejecido.



7. COROLARIO

En este apartado se pretende resumir las principales ideas obtenidas con la realización de este trabajo de investigación, así como aportar posibles recomendaciones para proyectos futuros o para continuar y mejorar este con posibles caminos alternativos por los que seguir analizando el envejecimiento del aceite mineral aislante de los transformadores de potencia.

7.1. Conclusiones

7.1.1. Factor de pérdidas

Se observa una mayor diferencia entre las curvas de las diferentes muestras de aceite a muy baja frecuencia. Se puede afirmar que se aprecia mejor el valor real de pérdidas cuanto menor sea la frecuencia de trabajo y menor tensión de medida.

De este modo, a bajas frecuencias el comportamiento de la tangente de pérdidas es más representativo del efecto de la humedad en el aceite y los cambios ocasionados en el dieléctrico a medida que aumenta ésta. De todas formas el factor de pérdidas tiene una clara tendencia a aumentar conforme lo hace el envejecimiento.

También se ha podido observar que a medida que aumenta la humedad en el aceite, también aumenta el valor de la tangente de δ , y con esta se establece un aumento en la conductancia, el cual ha sido ya probado.

7.1.2. Capacidad

De las mediciones realizadas en las muestras, se puede concluir que se produce una mayor precisión del valor de la capacidad a muy baja frecuencia y con una tensión de medición alta, por lo que se recomienda el emplear frecuencias inferiores a 0,001Hz para la toma de capacitancias. Se denota en la clara diferenciación de cada curva.

Para bajas frecuencias el aceite aumenta su capacidad de manera directamente proporcional al aumento de la humedad contenida. El valor es más preciso si la medición es realizada con una tensión lo más alta posible.

A frecuencia de red, la capacidad es constante siempre, sin que influya ni la humedad ni la tensión de envejecimiento. Por lo comprobado en este proyecto, a partir de una frecuencia mayor a 1Hz, no se aprecian diferencias en los valores de las capacidades de las distintas muestras.

También se ha comprobado que a bajas frecuencias el comportamiento de la capacidad es similar al de la tangente de pérdidas, siendo más notable a medida que aumenta la humedad en el aceite.



7.1.3. Conductividad

El aceite mineral aislante tiene una tendencia a aumentar la conductividad según sea mayor el nivel de envejecimiento de la muestra. Así mismo, y como se ha comprobado anteriormente, cuanto mayor sea la tensión aplicada a la muestra de aceite en su proceso de envejecimiento, mayor conductividad presentará.

Existe también la relación entre la frecuencia, y la conductividad, por la que a menor valor de frecuencia, la conductividad se verá reducida, y esta aumentará cuanto mayor sea la frecuencia a la que se encuentra.

Se comprobó que la humedad en las muestras de aceite juega un papel muy importante para la conductividad, ya que una mayor cantidad de agua supondrá un ligero aumento en la conductividad. Todo ello afectará en el factor de pérdidas, aumentando conforme aumente la conductividad.

Existe una relación entre el contenido de humedad, las pérdidas y la capacidad de las muestras, de forma que a bajas frecuencias la capacidad y las pérdidas aumentan al aumentar en contenido de humedad de las mismas.

7.2.Recomendaciones

Según los resultados obtenidos en el proyecto se pueden considerar varias recomendaciones futuras que puedan, no solo mejorar, sino también complementar las conclusiones obtenidas en este estudio:

- ✓ Al ser todas las propiedades dieléctricas, en mayor o en menor medida, dependientes con la temperatura, se debería haber tomado en cuenta este dato para un mejor análisis de los resultados.
- ✓ Sería atractivo el poder ver el comportamiento del aceite con un mayor tiempo de envejecimiento, superior a las 960 horas, para poder determinar si los datos obtenidos continúan una línea constante y si los resultados son proporcionales al envejecimiento de las muestras.
- ✓ La diferencia entre los resultados obtenidos en aquellas mezclas donde se les aplicó una tensión de 1000V y aquellas donde no se les aplicó tensión alguna son notables, por lo que sería de agrado el poder aplicar una mayor tensión al aceite en su proceso de envejecimiento. Esta labor sería complicada de realizar ya que los equipos necesarios no estarían a nuestro alcance.
- ✓ Sería conveniente ampliar el número de muestras usadas, así como variar la temperatura a las que se las ha tratado. En este proyecto se analizaron aceites tratados a 100°C y a 120°C, aunque finalmente fueron estas últimas el único objeto de estudio.



- ✓ Quizá la única propiedad que nos ha faltado por estudiar haya sido el comportamiento de la rigidez dieléctrica en las distintas muestras de aceite, y de su variación a lo largo del envejecimiento de las mismas, puesto que un aceite seco y limpio se caracteriza por tener una elevada rigidez dieléctrica, y el agua libre y las partículas formadas con el envejecimiento reducen severamente esta propiedad. Esto queda pendiente de comprobar, y se propone para futuros ensayos para poder permitir la medición de la aptitud del aceite a la hora de resistir las sollicitaciones dieléctricas que se permiten en servicio.

En especial se recomienda continuar con el análisis del envejecimiento del aceite mineral aislante de los transformadores para un mayor rango de frecuencias y seguir comprobando los efectos que la humedad produce en él.



8. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] **J. Sanz Feito**; *Máquinas Eléctricas*. Departamento de Ingeniería eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, 2002.
- [2] **R. Bartnikas**; *Engineering Dielectrics*. Vo. III:Electrical Insulating Liquids Institut de Recherche d'Hydro – Québec. September, 1991.
- [3] **J. G. Trasancos**; *Instalaciones Eléctricas en Media y Baja Tensión*. ITP An Internacional Company. Madrid, 1999.
- [4] **Smith W.F**; *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*.
- [5] **Nynas**; *Aceites de Transformador: Impacto del aceite aislante en la vida útil del transformador*. Conferencie Nynas Naphthenic. 2003.
- [6] **Jesús Fraile Mora**; *Máquinas Eléctricas*.
- [7] **H. Carl Manger, J. R. Reynolds**; *Insulating Mineral Insulating Oil (Transformer Oil)*. Doble Engineering Company. 2005.
- [8] **T.O. Rouse**; *Mineral Insulating Oil in Transformer*. Berkshire Environmental Consultants,IEEE Electrical Insulation Magazine1998.
- [9] **Alberto Requena, José Zúñiga**; *Espectroscopia*. Departamento de Química Física. Universidad de Murcia.
- [10] **Walter S.Zaengl**; *Applications of Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment*. Swiss Federal Institute of Technology (ETH)
- [11] **A. K. Jonscher**; *Dielectric Relaxation in Solids*. Chelsea Dielectrics Press. London, 1983
- [12] **Walter S.Zaengl**; *Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain I: Theoretical Considerations*. Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich Swizerlald.
- [13] **James W. Robinson**. *Practical Handbook of Spectroscopy*
- [14] **Chandima Ekanayake**; *Application of Dielectric Spectroscopy for Estimating moistureContent in Power Transformers*. Department of electric Power Engineering. Chalmers University of technology.
- [15] **User's Manual IDA200**.
- [16] **A. de Pablo**; *Envejecimiento y tratamiento de aceites minerales aislantes en servicio*.Conferencias ASINEL, 1984.