

CALIDAD DEL ACEITE DIELECTRICO UTILIZADO EN TRANSFORMADORES

CLARA ROSA ROJO

Profesora Asociada Departamento de Electricidad y Electrónica
Facultad de Minas - Universidad Nacional de Colombia

RESUMEN :

El aceite dieléctrico juega un papel muy importante en el funcionamiento de transformadores, eleva la rigidez dieléctrica del aislamiento, refrigera y protege las partes activas del mismo. Para evaluar sus características físicas, químicas y eléctricas, existen procedimientos de prueba que garantizan su punto óptimo de funcionamiento : Rigidez Dieléctrica, Número de Neutralización, Contenido de Humedad, Estabilidad de Oxidación, Tensión Interfacial, Punto de anilina, Factor de Potencia, Gravedad Específica, Punto de inflamación, Color y Cromatografía de Gases.

ABSTRACT :

The electrical insulating oil of petroleum origin intended for use in transformers and other electrical apparatus where the oils are used as insulating or heat transfer media the purpose of the paper is to outline the applicability of the available test methods for measuring of the property : Physical, Electrical, Chemical.

1. INTRODUCCIÓN

El aceite dieléctrico derivado del petróleo es utilizado en dispositivos eléctricos como transformadores, disyuntores, cables, etc., en los transformadores su función es doble :

- Llena los poros del aislamiento fibroso y los espacios entre los conductores de los devanados,

entre éstos y el tanque del transformador elevando considerablemente la rigidez dieléctrica del aislamiento.

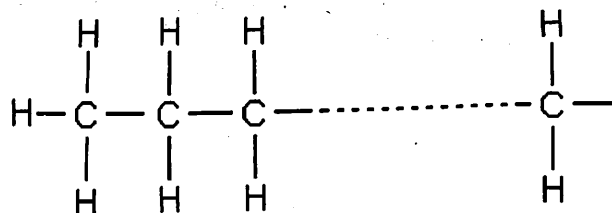
- Mejora la extracción del calor que se desprende a causa de las pérdidas en el arrollamiento y el núcleo del transformador.

Si el aceite dieléctrico no cumple con estas funciones, el dispositivo puede quedar fuera de servicio ocasionando pérdidas económicas e interrupciones en el suministro de energía eléctrica.

Los aceites han sido objeto de estudio por varios años, estableciéndose una serie de pruebas para determinar su calidad, las condiciones óptimas para su funcionamiento y las influencias de las impurezas en su degradación.

2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEITES DIELECTRICOS.

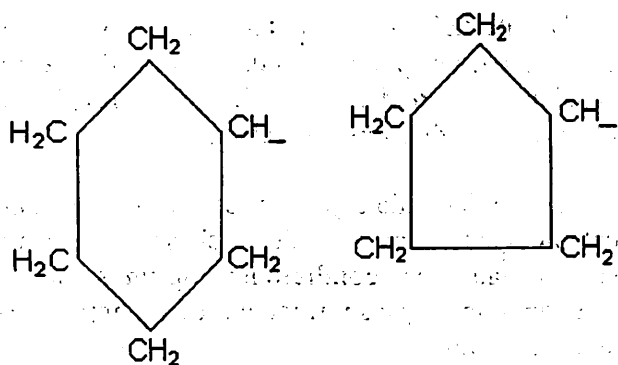
Los aceites dieléctricos son una mezcla de diferentes hidrocarburos : Parafínicos, nafténicos y aromáticos. La serie de hidrocarburos parafínicos representa la unión de carbono e hidrógeno en forma de cadenas moleculares, cuyo tipo de estructura es la mostrada en la figura



Como se observa en la fórmula química, estas cadenas pueden ser de diferentes longitudes dependiendo del número de átomos de carbono (3).

La serie de hidrocarburos alifáticos pueden expresarse en la fórmula general C_nH_{2n+2} , $n \in \mathbb{Z}^+$. Además cuando $n = 5$ (temperatura ambiente) se presentan como sustancias cristalinas. Los hidrocarburos parafínicos o alifáticos poseen estabilidad química, resistentes a la oxidación ya que forman compuestos saturados.

Los hidrocarburos nafténicos se presentan como una unión de carbono con hidrógeno en forma de cadenas cerradas con eslabones laterales. Por esta razón, estos compuestos se llaman Hidrocarburos Cíclicos. Su contenido de aceite alcanza de 70 a 85%.



Los hidrocarburos aromáticos son agregados cíclicos de carbonos e hidrógenos, que análogamente a los de nafta, tienen cadenas laterales muy grandes, las cuales son deseables en la composición de los aceites; sin embargo, una cantidad excesiva de ellos reduce la temperatura de ignición de los vapores de aceite y provoca precipitaciones; como resultado de esto se degradan las propiedades dieléctricas del aceite.

En general, los aceites tienen mejores proporciones de bases parafínicas y nafténicas, de un 4 a 8% de compuestos aromáticos (2).

2. PROPIEDADES FÍSICAS.

2.1 COLOR

El aceite dieléctrico utilizado en transformadores, es un líquido que puede ser desde incoloro hasta un color amarillo oscuro, producto del proceso de deterioro.

2.2 PUNTO DE INFLAMACIÓN

Es la menor temperatura a la cual se generan vapores inflamables sobre la superficie del aceite. La peligrosidad del aceite se valora por su temperatura de inflamación (5).

La temperatura a la cual el vapor es generado a una velocidad constante, tal que la combustión se mantenga, es llamado punto de incendio.

2.3 PUNTO DE FLUIDEZ

Es la temperatura más baja en la cual el aceite fluye. La contaminación y el deterioro tiene gran influencia sobre el punto de fluidez.

Su determinación contribuye con la identificación de los diferentes tipos de aceite y permite establecer en que clase de dispositivos pueden ser utilizados.

2.4 DENSIDAD RELATIVA

Propiedad que relaciona el peso y el volumen de un producto. Cuando el aceite dieléctrico es calentado se expande, reduciendo así el peso por unidad de volumen; sirve para identificar el tipo de aceite dieléctrico.

El valor nominal de esta propiedad es de 0.9 para 15°C.

2.5 VISCOSIDAD

Es la resistencia que ofrece el aceite a fluir de manera continua. La cantidad de calor por hora que es capaz de transferir el aceite del transformador al medio ambiente depende de la viscosidad (1).

2.6 PUNTO DE ANILINA

Está relacionado con la propiedad que tiene el aceite dieléctrico de disolver materiales con los cuales puede entrar en contacto (5). Permite medir la potencia de dilución de ese derivado del petróleo por medio de anilina y sustancias aromáticas, para conocer el poder solvente del aceite dieléctrico.

2.7 TENSIÓN INTERFACIAL

Se produce por las fuerzas de atracción que existen entre las moléculas del aceite. "Cuando dos líquidos tienen una tensión superficial muy diferente, normalmente son insolubles como ocurre con el aceite y el agua. En la interface o superficie de contacto de dos líquidos insolubles, ocurre una interacción molecular que modifica la tensión interfacial, la cual es siempre referida al agua como patrón de comparación" (4).

Una disminución de la tensión interfacial indica el inicio del deterioro del aceite (5).

3. PROPIEDADES ELÉCTRICAS.

3.1 RIGIDEZ DIELECTRICA

Es el máximo campo eléctrico que puede soportar el aceite sin producir descarga disruptiva.

La rigidez dieléctrica del aceite es una magnitud muy sensible a su humectación. Una impureza muy pequeña de agua hace que disminuya muy bruscamente la rigidez dieléctrica del aceite, esto se explica porque la permitividad del agua es mucho más alta que la del aceite, por la acción de las fuerzas del campo eléctrico las gotas de agua suspendidas en el aceite, son atraídas hacia los puntos en que la tensión del campo es mayor y donde precisamente comienza a desarrollarse la perforación. La rigidez dieléctrica del aceite disminuye aun más bruscamente si además de agua hay en él impurezas fibrosas las cuales, por la acción de las fuerzas del campo se alinean siguiendo las líneas de campo eléctrico, lo que facilita la perforación del aceite.

3.2 FACTOR DE POTENCIA

El concepto de factor de potencia en los materiales aislantes será estrechamente ligado al de pérdidas dieléctricas; las pérdidas dieléctricas se pueden entender como la energía disipada en un dieléctrico cuando actúa sobre él un campo eléctrico que provoca su calentamiento (3).

En los líquidos no polares como el aceite, estas pérdidas son una consideración mínima ya que solo se deben a la conductancia que es extraordinariamente pequeña, si no hay presencia de sustancias extrañas o impurezas con moléculas dipolares.

Las moléculas dipolares giran en el medio viscoso siguiendo la variación del campo, provocando así pérdidas de energía eléctrica por el rozamiento que genera el calor.

Cuando la viscosidad del líquido es suficientemente grande, las moléculas no alcanzan a seguir la variación del campo y prácticamente desaparece la polarización dipolar, las pérdidas dieléctricas serán entonces pequeñas (1).

También serán reducidas en el caso de los líquidos con baja viscosidad ya que la orientación de las moléculas se efectúa sin rozamiento.

En los líquidos con viscosidad liviana, como el aceite dieléctrico, las pérdidas dipolares pueden tener un valor de magnitud significativa. En tal caso, se reduciría la eficiencia de la unidad y se podría producir un peligroso aumento en la temperatura de la misma.

En un dieléctrico, la corriente aumenta a medida que la impedancia disminuye. Sin embargo, solo una porción de esta corriente está relacionada con este efecto, la componente equivalente a una corriente activa. Las pérdidas dieléctricas son directamente proporcionales a dicha corriente (2).

La relación de corriente activa a la corriente alterna total varía, teóricamente, de uno a cero. esta relación es conocida como el factor de potencia del dieléctrico

DYNA 122 - 1997


UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE EN
DEPTO. DE MINAS
BIBLIOTECAS

y puede ser considerada como una propiedad inherente a él.

Como el factor de potencia de un aislante está en relación directa con la pérdida de poder dieléctrico, mientras más bajo sea el primero, más se reducirán las segundas.

La relación matemática que define la pérdida de poder dieléctrico de un material aislante es idéntica a la que define el factor de potencia de un circuito A.C.; sin embargo, estos dos conceptos no deben confundirse.

Mientras que el factor de potencia de un circuito A.C. afecta las pérdidas de línea, el factor de potencia de un aislante afecta las pérdidas dieléctricas locales.

Un dieléctrico puede ser simulado eléctricamente por un circuito serie o paralelo :

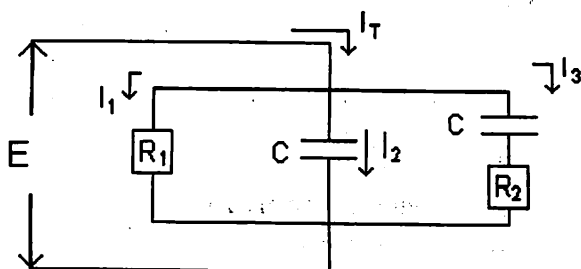


Figura 1. Circuito equivalente de un dieléctrico.

Donde :

- E : Voltaje
- C : Permitancia del dieléctrico (aceite)
- R_1 : Reacción a la corriente de fuga
- R_2 : Reacción a la corriente de absorción
- I : Corriente total

$$\bar{I}_T = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3$$

$$|I_3| \ll |I_1| \ll |I_2|$$

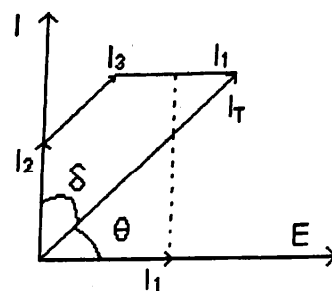


Figura 2. Diagrama fasorial para el cálculo de las pérdidas dieléctricas

La potencia activa disipada en el dieléctrico se puede expresar como :

$$P = V^2 \omega C \tan \delta \quad [W]$$

3.2.1 Factor de potencia evaluado en un proceso de oxidación (PFVO). La prueba PFVO involucra la oxidación progresiva del aceite bajo condiciones normalizadas de temperatura, tiempo, exposición al aire y presencia de un metal catalizador, para medir continuamente las características eléctricas en un aceite durante un proceso de vida acelerada (2) y obtener una gráfica del factor de potencia durante este proceso.

Se ha reconocido que esta prueba es una medida de la presencia y comportamiento de contaminantes y otras sustancias indeseables en un aceite en términos de pérdidas dieléctricas y factor de potencia (2).

El valor a determinar es el tiempo transcurrido desde el comienzo de la prueba hasta la aparición de lodos por la oxidación. Para ayudar a la detección del lodo, la muestra de aceite es diluida con pentano, el cual tiende a coagular el lodo hasta que cambie de un estado de solución a una forma sólida (2).

Es necesario tener en cuenta que solo las lecturas de factor de potencia no son criterios absolutos para reconocer un buen aceite.

La curva PFVO es una herramienta muy útil para clasificar aceites, también mide directamente la cantidad de sustancias deseables denominados aromáticos instaurados, los cuales son responsables de la resistencia a la oxidación, cualidad que da al aceite su característica de vida libre de lodos (2).

4. ENSAYOS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE LOS ACEITES DIELECTRICOS EN SERVICIO.

El agua y el calor son los mayores enemigos del aislamiento del transformador, con la ayuda de pruebas y ensayos periódicos se pueden establecer las condiciones de deterioro del aislamiento, detectar fallas incipientes y tomar las medidas más adecuadas para evitar su envejecimiento prematuro.

Es necesario someter el aceite dieléctrico utilizado en transformadores a las siguientes pruebas :

Examen Visual	Norma ASTM* D-1524
Color	Norma ASTM D-1500
Gravedad Específica	Norma ASTM D-1298
Rigidez Dieléctrica	Norma ASTM D-877 y D-1816
Sedimentación	Norma ASTM D-1698
Factor de Potencia	Norma ASTM D-924
Número de Neutralización	Norma ASTM D-1534 y D-974
Tensión Interfacial	Norma ASTM D-971
Humedad	Norma ASTM D-1533
Análisis Cromatográfico de Gases	Norma ASTM D-3612
Factor de Potencia evaluado en un proceso de oxidación (PFVO)	

*ASTM : AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL.

Con excepción del análisis cromatográfico de gases disueltos en el aceite, las demás pruebas pueden ser realizadas en el lugar de instalación del transformador.

4.1 ENSAYO VISUAL Y COLOR.

Norma ASTM D-1524 69/79

Objetivo : Verificar el color del aceite dieléctrico, la existencia de partículas sólidas y gotas de agua en suspensión.

En la escala normalizada del color :

Aceite nuevo, el color corresponde a un valor de 0.5

Aceite envejecido, el color corresponde a un valor de 8

El límite medio para trabajo continuo es 2.7 (5).

En algunos casos el color puede servir como indicador del grado de refinación el material ; cuando el rango de color de un producto en particular es conocido, una variación fuera de éste, puede indicar una posible contaminación con otros productos.

4.2 ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA.

Norma ASTM D-1298/80

En la industria del petróleo, la densidad API (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE) es la más usada, es una escala arbitraria calibrada en grados y relacionada a la gravedad específica por medio de la siguiente ecuación :

$$Densidad_{API} = \frac{141.5}{Gravedad\ Específica_{60/60\ F}} - 131.5$$

La densidad sirve para identificar el tipo de petróleo, los parafínicos tienen gravedades específicas más bajas que los nafténicos o aromáticos en el mismo rango de ebullición.

Objetivo : Determinar la densidad relativa del aceite, esto es, la relación entre la masa de un determinado volumen de aceite y la masa de un volumen igual de agua a 15°C.

Aceite nuevo, densidad relativa 0.9. Valores diferentes al mencionado anteriormente pueden indicar contaminación del aceite por líquidos extraños.

4.3 ENSAYO DE RIGIDEZ DIELÉCTRICA.

Norma ASTM D-1816 y D-877

Objetivo : Evidenciar la presencia de agentes contaminantes que deterioran la rigidez dieléctrica del aceite.

4.3.1 ASTM D-877: Este método es recomendado para ensayos de aceites filtrados, desgasificados y deshidratados antes y después de su puesta en servicio en equipos con tensión nominal mayor a 230 kV.

No es propio para aceites recibidos de carro-tanques.

4.3.2 ASTM D-1816: Este método es recomendado para ensayos de aceites filtrados, desgasificados y deshidratados antes y después de su puesta en servicio en equipos eléctricos de potencia con tensiones nominales mayores o iguales a 230 kV.

Ambos métodos son recomendados para equipos eléctricos de potencia con tensión nominal menor a 230 kV.

La rigidez dieléctrica de un aceite dieléctrico nuevo debe ser mayor de 50 kV/cm, valor mínimo admisible (5).

4.4 ENSAYO DE SEDIMENTACIÓN.

Norma ASTM D-1698/64-78

Objetivo : Determinar el sedimento y lodo insoluble en el aceite aislante envejecido.

Es propio para aceites con baja viscosidad, 5.7 a 13.0 cst a 40°C. su uso no está reglamentado para aceites dieléctricos con alta viscosidad.

“Sedimento es cualquier sustancia o sustancia sólida insoluble a una temperatura de ensayo o temperatura ambiental que puede ser separada por centrifugación para determinadas y específicas condiciones” (5).

4.5 ENSAYO DE FACTOR DE POTENCIA.

Norma ASTM D-924/81

El factor de potencia para un aceite dieléctrico nuevo debe ser menor o igual a 0.5%. El valor máximo admisible del factor de potencia de un aceite para un transformador sumergido en aceite en servicio es de 0.7%.

Un factor de potencia alto indica la presencia de humedad, resina, barnices y otros productos que pueden deteriorar el aceite.

4.6 ENSAYO DE NÚMERO DE NEUTRALIZACIÓN.

Norma ASTM D-974/80

Objetivo : Determinar el número total de ácidos en el aceite dieléctrico cuando su viscosidad es menor que 4 cst a 40°C.

Los aceites dieléctricos nuevos de buena calidad no presentan números altos de acidez, la norma ASTM establece un valor máximo de 0.03 mgr de KOH/gr ; pero cuando el aceite presenta deterioro por un proceso de oxidación la acidez se incrementa notablemente. Este hecho ha sido relacionado frecuentemente con la corrosividad, lo cual es cierto en muchos casos, pero la generalización puede conducir a conceptos erróneos, puesto que se estarán desconociendo las complejas reacciones que al interior del aceite mismo se presentan con esta sustancia (2).

4.7 ENSAYO DE TENSIÓN SUPERFICIAL.

Norma ASTM D-971

Esta prueba es útil para determinar cualitativamente la presencia de productos intermedios de oxidación tales como alcoholes y aldehídos, los cuales no se detectan con la prueba del número de neutralización, lo que indica que un bajo valor de este parámetro, no implica necesariamente que el proceso de oxidación del aceite no se haya iniciado.

El número de neutralización y la tensión interfacial tienen un comportamiento inverso con relación al tiempo de trabajo.

Los contaminantes polares solubles provenientes de la descomposición del aislamiento sólido y de cuerpos con los cuales el aceite entra en contacto, provocan una disminución de la tensión superficial del aceite.

Para aceites dieléctricos nuevos la tensión superficial debe ser mayor a 40 dinas/cm.

4.8 ENSAYO DE HUMEDAD.

Norma ASTM D-1533

Un contenido de humedad de 50 p.p.m. en el aceite dieléctrico de la parte superior del transformador es considerado crítico e indica la necesidad de eliminarlo.

El método más preciso para medir la cantidad de agua presente en un aceite es KARL FISCHER por titulación coulométrica; el yodo en el reactivo KARL FISCHER, reacciona con el agua presente en la muestra de aceite, terminándose la reacción en el momento en el que se consume la totalidad del agua presente. El aparato detecta y mide la carga electrostática en coulombios generada por la reacción y transduce dicho valor a p.p.m. de agua, dándole la información al aparato del peso de la muestra.

4.9 ENSAYO DE CROMATOGRAFÍA DE GASES.

Norma ASTM D-3612

La cromatografía es la separación física de dos ó más compuestos, basada en la diferente distribución de dos fases, de las cuales una es estacionaria y la otra es móvil. En el caso de la cromatografía de gases, los gases que pueden ser determinados e identificados son :

H ₂	Hidrógeno
O ₂	Oxígeno
N ₂	Nitrógeno
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
C ₂ H ₂	Acetileno
C ₂ H ₄	Etileno
C ₂ H ₆	Etano
C ₃ H ₆	Propileno
C ₃ H ₈	Propano

Tabla 1. Valores típicos admisibles de prueba (4).

Prueba	Aceite Dieléctrico Nuevo	Aceite Dieléctrico Usado	Norma
Rigidez dieléctrica (kV)	> 50	≥ 40	ASTM D-877
	> 60	≥ 70	CEGVDE
	> 70	≥ 58	ASTM D-1816
Contenido de agua	10	15	ASTM D-1533
Acidez (mg KOH/g)	0.03	0.1 - 0.2	ASTM D-974
Tensión interfacial	0.045	0.02	ASTM D-971
Color	0.5	1 - 1.5	ASTM D-1500
Pérdidas dieléctricas	0.01	0.1 - 0.3	ASTM D-974

5. DETERIORO DEL ACEITE DIELÉCTRICO

Al envejecer el aceite dieléctrico se pone más oscuro y dentro de él se forman impurezas (ácido, resinas), una parte de las cuales es soluble en el aceite y otra insoluble, ésta últimos como son más pesados sedimentan en el fondo del tanque y sobre las piezas sumergidas en el aceite formando una capa de lodo que empeora sensiblemente la extracción de calor de los elementos que se calientan. Los ácidos de bajo peso molecular que se forman en el aceite estropean el aislamiento de los devanados y provocan la corrosión de los metales que están en contacto con él. Con el envejecimiento aumenta la viscosidad y el índice de acidez del aceite y disminuyen sus propiedades dieléctricas (3).

La velocidad de envejecimiento del aceite dieléctrico aumenta :

Por la presencia de aire, ya que el envejecimiento depende en alto grado de su oxidación por el oxígeno, aun es más intenso el envejecimiento cuando el aceite entra en contacto con el ozono.

- Si la temperatura se eleva.
- Si el aceite dieléctrico esta en contacto con ciertos metales (cobre, hierro, plomo) y con otras sustancias (catalizadores de envejecimiento).

Por la acción de la luz.

- Por la acción del campo eléctrico.
- Por la acción de choques mecánicos.

Cuando el envejecimiento tiene lugar en un campo eléctrico algunos tipos de aceites desprenden gases. Los aceites dieléctricos de distinto origen presentan diferentes resistencias al envejecimiento, por esto, antes de empezar a utilizar un aceite debe someterse a un ensayo de envejecimiento acelerado en condiciones rigurosas (3).

5.1 OXIDACIÓN DEL ACEITE.

El aceite contaminado es aquel que contiene agua y otras sustancias extrañas que no son producto de su

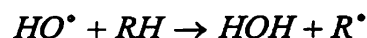
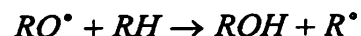
descomposición. Un aceite deteriorado es aquel que contiene productos resultantes de su oxidación. Según la American Society Of Testing And Materials (ASTM), el proceso de oxidación del aceite se inicia cuando el oxígeno entra en combinación de hidrocarbonatos y la presencia de catalizadores existentes en el transformador (cobre, hierro). Estos hidrocarbonatos son considerados como impurezas del aceite.

El oxígeno existe libre en el aire que está en el interior del transformador y disuelto en el aceite aislante. La degradación de la celulosa es fuente de oxígeno.

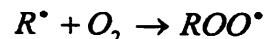
Las reacciones de oxidación tienen la siguiente secuencia : Hidrocarbonato RH reacciona con el oxígeno O_2 formando hidroperóxido ($RH + O_2 \rightarrow ROOH$) que se disocia en dos radicales altamente reactivos :



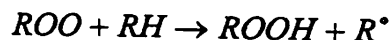
Los radicales libres reaccionan con moléculas de hidrocarbonatos y liberan otros radicales :



Los radicales libres reaccionan con el oxígeno formándose nuevos radicales :



que a su vez reaccionan con nuevas moléculas de hidrocarbonatos liberando nuevos radicales :



y así sucesivamente.

Los hidroperóxidos también se puede descomponer en forma de aldehídos y cetonas que pueden ser oxidados y formar ácidos y éteres.

Los inhibidores son sustancias que evitan la oxidación ; el aceite posee inhibidores materiales que son componentes de azufre térmicamente estable.

El inhibidor interrumpe por lo tanto, reacciones de oxidación en la etapa inicial, los hidrocarbonatos dejan de reaccionar hasta que se agote el inhibidor. Los hidrocarbonatos saturados cuando son oxidados forman ácidos corrosivos.

Agentes aceleradores de la oxidación del aceite son :

- El calor.
- El campo eléctrico.
- La vibración.
- Los choques mecánicos.
- Los choques de carga.

El calor es el mayor acelerador, cuanto más elevada es la temperatura del aceite mayor será la velocidad de oxidación.

Los productos de la oxidación del aceite son hidroperóxidos estables, que reaccionan con la celulosa formando oxixelulosa, en seguida se forman alcoholes, aldehidos, cetonas, ácidos, aguas, jabones metálicos. Los ácidos tienen una acción catalizadora en el proceso de oxidación del aceite.

El número crítico de neutralización es de 0.25 mg de KOH por gramo de aceite.

Tablas 2 - 3. Datos obtenidos por la ASTM en once años de ensayos a 500 transformadores estableciendo la relación entre el número de neutralización y la tensión interfacial y la formación de sedimentos en transformadores de aceite.

Número de Neutralización y Formación de Sedimento		
Número de Neutralización (mg KOH/g)	% (de 500 unidades)	Número de unidades con formación de Sedimento
0.00 a 0.10	0	0
0.11 a 0.20	38	190
0.21 a 0.60	72	360
0.60 a valores superiores	100	500

Tensión Interfacial y Formación de Sedimento		
Tensión Interfacial (dinas/cm)	% (de 500 unidades)	Número de unidades con formación de Sedimento
Abajo de 14	100	500
De 14 a 16	85	425
De 16 a 18	69	345
De 18 a 20	35	175
De 20 a 22	33	165
De 22 a 24	30	150
Encima de 24	0	0

NOTA : En la figura 3 se observa el proceso de deterioro de un aceite dieléctrico.

En caso de cortocircuito, la temperatura del aceite dieléctrico puede alcanzar un valor de 500°C. Cuando el aceite está supercalentado, se pueden formar gases como :

- CH₄, metano
- C₂H₆, etano
- C₂H₄, etileno
- CO₂, bióxido de carbono.

La pirólisis del aceite provocado por el arco eléctrico puede dar origen a la formación de gases como :

- H₂, hidrógeno
- C₂H₂, acetileno
- CH₄, metano
- C₂H₂, eliteno

Además del calor también contribuyen a la formación de los gases :

- Descargas parciales (Corona). El efecto corona puede ocurrir en los conductores con un voltaje cerca

de los 12 kV.

Arco eléctrico. Es una descarga prolongada e intensa debido la falla del aislamiento.

6. MÉTODOS DE DETECCIÓN DE GASES COMBUSTIBLES

Pueden ser detectados por dos métodos básicos :

- Cromatografía de gases.
- Ensayo de gases combustibles.

Las directrices son las siguientes : Una concentración de gases de 0 a 500 p.p.m. de gas combustible indica deterioro normal del aislamiento ; se debe repetir el análisis cada seis meses.

Una concentración de gases de 501 a 1200 p.p.m. indica deterioro excesivo del aislamiento y el ensayo debe repetirse cada tres meses.

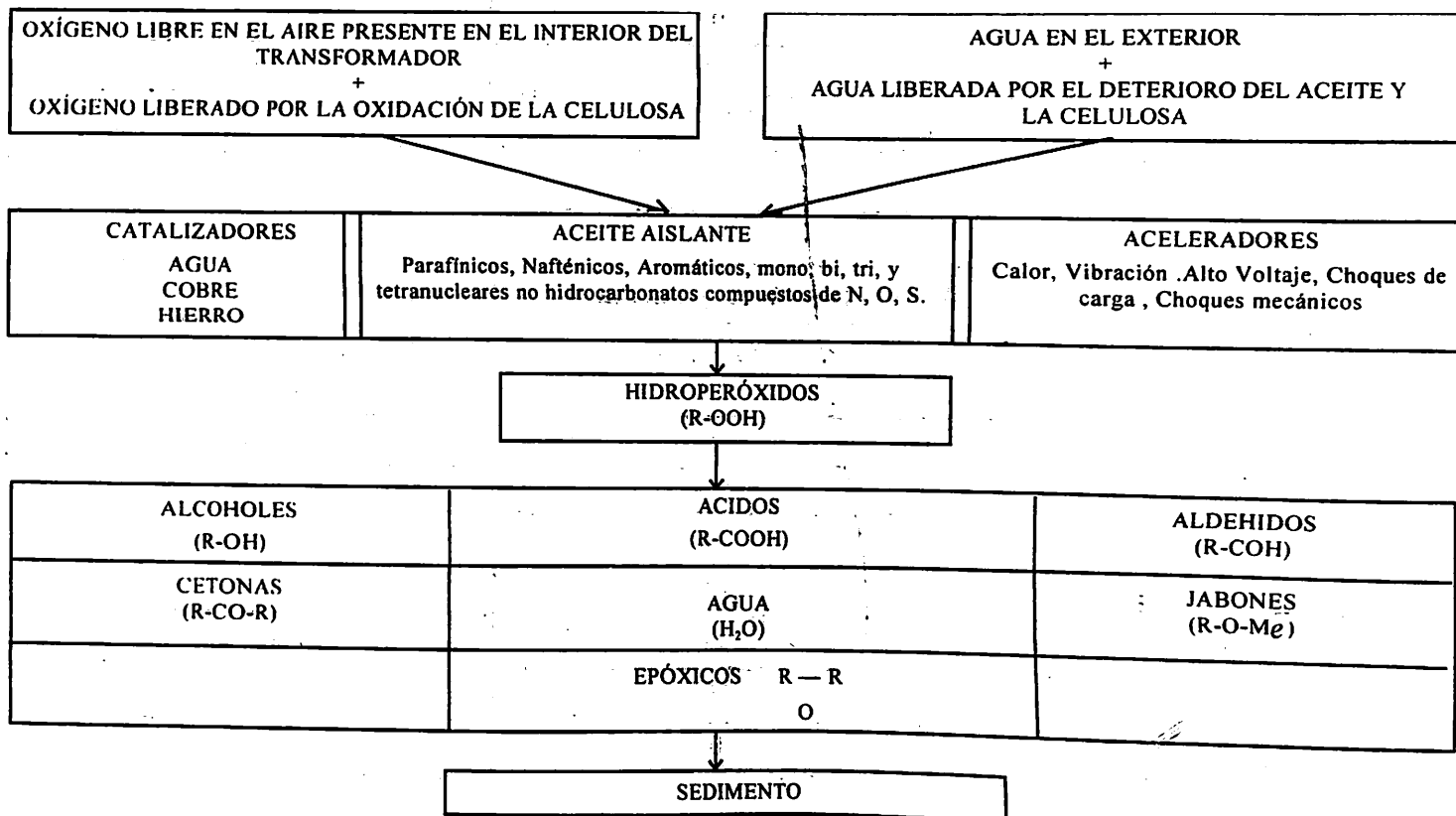


Figura 3. Proceso de deterioro del aceite dieléctrico

Tabla 4. Relación entre gases disueltos en los aceites y condiciones de falla.

Gases Detectados	Interpretación
$N \pm 5\%$ de O_2	Operación normal de transformadores sellados.
$N + 5\%$ de O_2	Verificar el sellado hermético del transformador.
N_2 , CO_2 o ambos	Transformador sobrecargado operando con sobrecalentamiento, produciendo descomposición de celulosa. Verificar condiciones de operación.
N_2 y H_2	Corona, electrólisis de hierro y agua.
N_2 , H_2 , CO y CO_2	Flameo u otra causa secundaria que causa la descomposición del aceite.
N_2 , H_2 , CH_4 , CO_2 y otros hidrocarbonatos en pequeña cantidad ; C_2H_2 generalmente ausente	Flameo u otra falla secundaria en presencia de la celulosa.
N_2 , H_2 y otros hidrocarbonatos inclusive C_2H_2	Arco elevado de energía (con rápido deterioro el aceite)
N_2 , H_2 , CH_4 , etileno y algún acetileno	Arco de elevada temperatura debido a conexiones en mal estado ; cortocircuito entre espiras.
N_2 , H_2 , COA , CO_2 y CH_4	Idem anterior con arco que envuelve la celulosa

7. CONCLUSIONES.

Es recomendable que anualmente se hagan pruebas físicas, químicas y eléctricas al aceite dieléctrico utilizado en los transformadores.

Los valores límites recomendados para uso continuo son :

Color : 2.7 escala patrón (valor máximo)
 Densidad relativa : 0.875 (aproximadamente)
 Aspecto : claro y transparente

Rigidez dieléctrica : ≥ 40 kv. ASTM - 877
 ≥ 58 kv. ASTM - 1816

Tensión interfacial : 27 dinas/cm (valor mínimo)

Número de neutralización : 0.1 mg KOH/g (máximo)

Agua : 39 p.p.m. para $V \leq 69$ KV.
 25 p.p.m. para $69 < V \leq 238$ KV.
 20 p.p.m. para $V > 230$ KV.

Factor de potencia : 0.70% máximo
 Sedimento : claro (invisible)

Estos valores límite son recomendados para un buen mantenimiento preventivo (5).

Tabla 5. Relación entre el tiempo de servicio y el número de neutralización y tensión superficial.

Tiempo de Servicio (años)	Número de Neutralización (mg KOH/g)	Tensión Interfacial (dinas/cm)
De 1 a 5	0.05	35
De 6 a 10	De 0.06 a 0.10	30 a 35
Mayores de 10	Por encima de 10	Abajo de 30

La periodicidad recomendada para los ensayos físicos y químicos de los aceites dieléctricos usados en los transformadores es el siguiente :

	Temperatura del aceite en la tapa del tanque			
	60°C - 70°C	70°C - 80°C	80°C - 90°C	90°C - 100°C
Periodicidad de ensayos físicos y químicos	Anualmente	Cada seis meses	Cada cuatro meses	Mensualmente

REFERENCIAS.

1. ALSTON, L.L. High Voltage Technology. Oxford University Press, 1968. Pág.129-142
2. ALZATE E., C.E. y ARISTIZÁBAL, R.C. Análisis de la Calidad de los Aceites Utilizados en Transformadores de Distribución. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, 1995.
3. BOGORODITSKI, N.P. y otros. Materiales Electrotécnicos. Ed. Mir Moscú 1979
4. DROZDOV y NIKULIN. Estudio de Materiales Eléctricos. Cuba, Ed. Pueblo Educación, 1966.
5. MILASCH, Milan. Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante. Brasil, Ed. Edgard Blücher Ltda, 1984. Pág. 94-102
6. ROJO CEBALLOS, Clara Rosa y ORREGO PALACIO, Gustavo de J. Diseño y Construcción de un equipo para la medición de la rigidez dieléctrica de materiales sólidos y líquidos. Medellín, 1984.