

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI



UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

INGENIERÍA ELÉCTRICA

**TRABAJO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

TEMA:

**“SIMULACIÓN Y APLICACIÓN DE PRUEBAS DE RIGIDEZ DIELECTRICA DE
ACEITE PARA TRANSFORMADORES HASTA 15 KV. EN EL LABORATORIO
DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE
COTOPAXI.”**

POSTULANTES:

Sr. JUAN VINICIO VILLAMARIN REINOSO.

Sr. CHRISTIAN JORGE CÁCERES MIRANDA.

DIRECTOR: ING.ELEC. VICENTE QUISPE.

LATACUNGA – ECUADOR

JUNIO 2013

AUTORÍA

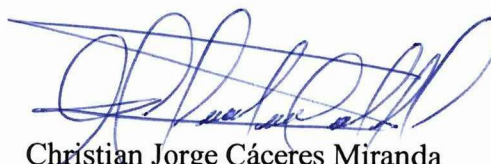
El contenido del presente trabajo de investigación constituye propiedad de los autores.

El trabajo fue realizado en la Universidad Técnica de Cotopaxi, de la ciudad de Latacunga por parte de los señores Juan Vinicio Villamarin Reinoso y Christian Jorge Cáceres Miranda, por lo tanto los autores asumen la responsabilidad de la misma.



Juan Vinicio Villamarin Reinoso

050254417-4



Christian Jorge Cáceres Miranda

180342223-5

AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS

En calidad de Director de Trabajo de Investigación sobre el tema:

“Simulación y aplicación de pruebas de rigidez dieléctrica de aceite para transformadores hasta 15 KV. en el laboratorio de Ing. Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi”, de Juan Vinicio Villamarin Reinoso y Christian Jorge Cáceres Miranda, egresados de la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científicos-técnicos suficiente para ser sometida a la evaluación del Tribunal de Grado, que el Honorable Consejo Académico de la Unidad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga 14 de junio del 2013



Ing. Vicente Quispe

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme llegar con salud a culminar esta etapa de la vida. Agradecer a mis padres y hermanos por el apoyo que me brindaron en el transcurso de mi vida universitaria, por estar ahí en los momentos más difíciles guiándome siempre por el buen camino.

Agradezco de manera muy especial a quienes hicieron posible la conclusión de este trabajo, a la Ing. Gladys Vega y a mi director de tesis el Ing. Vicente Quispe por su apoyo incondicional.

A todos mis parientes y amigos que me ayudaron cuando necesitaba apoyo de alguien en los momentos difíciles.

VINICIO

DEDICATORIA

Dedico a Dios.

A mis padres.

A mis hermanas y hermano,

Y a las personas que siempre me ayudaron cuando lo necesité.

VINICIO

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por haberme brindado la oportunidad de finalizar satisfactoriamente una etapa mi vida con éxito y salud, logrando alcanzar la meta propuesta al inicio de esta trayectoria.

Agradezco a mis padres por ser mi pilar fundamental de mi vida y ser el apoyo constante en los avatares de mi carrera universitaria, a mis hermanos por el apoyo incondicional brindado a través de este largo camino.

Agradezco de manera muy especial a la razón de mi vida mi hija Bianca, que me dio la fortaleza espiritual para seguir adelante siempre que me sentí derrotado.

Agradezco a la compañera incondicional que la vida me dio, mi esposa Ing. Gladys Vega, sin ella no hubiera tomado la dura decisión de volver a mi vida universitaria.

Agradezco a toda mi familia y amigos quienes con su apoyo me ayudaron a culminar este sueño deseado desde hace muchos años.

CHRISTIAN

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis a Dios.

A mis padres y hermanos.

Al amor de mi vida, mi esposa.

Y de manera muy especial a la luz de mis ojos Bianca, mi hija.

CHRISTIAN

RESUMEN

Este tema es de gran importancia iniciando desde la adquisición del equipo que forma parte del laboratorio de pruebas de diagnóstico de aislamiento en transformadores en la Universidad Técnica de Cotopaxi el mismo que es necesario para la Institución y para los estudiantes, ya que al contar con un laboratorio se puede reforzar los conocimientos adquiridos en las aulas.

Las pruebas de rigidez dieléctrica del aceite es una prueba muy importante ya que permite establecer si el aceite se encuentra en condiciones de seguir en funcionamiento o no.

Cuando el aceite pierde sus características la rigidez dieléctrica nos dará como resultado datos de resistencia bajos, lo cual señala que el aceite debe ser regenerado. Hay que tomar muy en cuenta que el aceite debe ser regenerado hasta que pierda totalmente sus propiedades y características, una vez que se termine su vida útil y no sea posible su regeneración se debe almacenar en centros de acopio permitidos y calificados para evitar contaminaciones ambientales.

La implementación de un programa es una parte importante de este proyecto ya que permite pronosticar y determinar el límite de resistencia de un aceite dieléctrico, en base a pruebas realizadas con un equipo especial de medición, (megger OTS 60Sx). Este programa disminuye tiempo y dinero ya que se basa en variables que se pueden determinar fácilmente al momento de la prueba, brindando una respuesta rápida y eficaz de manera ideal.

THEME: SIMULATIONS AND APPLICATIONS OF OIL DIELECTRIC STIFFNES TESTS FOR 15V TRANSFORMERS INTO THE LABORATORY TESTING AT THE TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI.

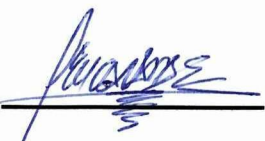
ABSTRACT

The acquisition of the equipment for the laboratory testing at the Technical University of Cotopaxi is very important for the institution and the students since it is vital to strengthen the knowledge which is acquired in the classroom.

The oil dielectric stiffness test is an important option that permits to establish if the oil is in good conditions to continue working.

When the oil loses its characteristics the dielectric stiffness will show low resistance data which means that the oil must be regenerated. It is necessary to take into account that the oil must be regenerated not changed because it will produce irreversible impacts for the environment.

The implementation of a program is an important part of this project, because it allows us to predict and determine the endurance limit of a dielectric oil, based on tests with a special measuring equipment (megger 60SX OTS). This program reduces time and money because it is based on variables that can be determined easily with the test offering a quick and effective answer.



Lic. Edgar Encalada

0501824171

ENGLISH TEACHER

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	6
1.1. MARCO TEÓRICO.....	6
1.1.1. Simulación.....	6
1.1.3. Construcción de los transformadores.....	6
1.1.4. El transformador ideal.....	7
1.1.5. Resumen de la clasificación de tipos de transformadores según su aplicación.	8
1.1.6. Aislamiento y refrigeración de los transformadores.....	9
1.1.6.1. Gases.	9
1.1.6.2. Líquidos.	9
1.1.6.3. Sólidos.....	10
1.1.6.4. Rigidez dieléctrica de los aislantes.	10
1.1.7. Los aceites aislantes en los transformadores.	12
1.1.8. Naturaleza de los aceites aislantes.	13
1.1.9. Envejecimiento del aceite.....	14
1.1.10. Propiedades de los aceites.....	14
1.1.11. Composición química de los aceites.....	17
1.1.12. Características de los aceites aislantes.....	20
1.1.12.1. Viscosidad.....	22
1.1.12.2. Contenido de aire.....	23
1.1.12.3. Rigidez dieléctrica.....	24
1.1.12.4. Factor de potencia y resistencia específica.	24
1.1.12.5. Acidez.....	25
1.1.12.6. Sedimentos.....	25
1.1.12.7. Tensión interfacial.	25

1.1.13. Pérdida de las características de los aceites aislantes.	26
1.1.13.1. Presencia de humedad.	26
1.1.13.2. Oxidación.	27
1.1.13.3. Contaminación.	27
1.1.14. Criterios de aceptación o rechazo de una prueba de resistencia de aislamiento.	28
CAPÍTULO II	30
2.1. INTRODUCCIÓN.....	30
2.2. Método de estudio.....	30
2.3. Técnicas e instrumentos.....	30
2.5. Resultados y análisis de la encuesta aplicada a los estudiantes de la Universidad Técnica de Cotopaxi.	32
2.6. Enunciado de la hipótesis.	38
CAPÍTULO III	42
3.1. INTRODUCCIÓN.....	42
3.2. Justificación de la propuesta.	42
3.3. OBJETIVOS.	43
3.3.1. Objetivo general.	43
3.3.2. Objetivos específicos.	43
3.4. Alcance de la investigación.	43
3.5. Procedimiento de la prueba.....	46
3.6. Introducción de Visual Basic, programa utilizado para la simulación.	47
3.7. Desarrollo de la propuesta.....	48
3.8. SIMULADOR REALIZADO EN VISUAL BASIC.....	56
3.8.1. Líneas de programación.	56
3.8.2. Procedimiento de la simulación	59
3.9. Conclusiones.....	60

3.10. Recomendaciones.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXOS.....	65
3.11. Normas de seguridad.....	66
3.12. Manual de operación del equipo y reglas a seguir.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rigidez dieléctrica a 100% en 60 ciclos.....	10
Tabla 2. Ciclos vs duración en segundos.....	11
Tabla 3. Características principales de un aceite aislante.....	22
Tabla 4. Valores permisibles de rigidez dieléctrica según condición de aceite. ..	28
Tabla 5. Valores mínimos de aislamiento recomendado en transformadores sumergidos en líquidos aislantes.	29
Tabla N° 6. Pregunta 1	32
Tabla N° 7. Pregunta 2	33
Tabla N° 8. Pregunta 3	34
Tabla N° 9. Pregunta 4	35
Tabla N° 10 Pregunta 5.	36
Tabla N° 11 Pregunta 6	37
Tabla N° 16. Datos de la primera prueba. (1 galga)	50
Tabla N° 17. Datos de la segunda prueba.(2 galgas).....	51
Tabla N° 18. Datos de la tercera prueba. (3 galgas)	51
Tabla N° 19. Datos de la cuarta prueba. (4 galgas).....	52
Tabla N° 20. Datos de la quinta prueba. (5 galgas).....	53
Tabla N° 21. Datos de la sexta prueba. (6 galgas)	53
Tabla N° 22. Resumen de datos de las pruebas realizadas	54
Tabla N° 23. Apariencia del aceite a utilizar.....	56

ÍNDICE DE GRÁFICOS.

Gráfico N° 1	32
Gráfico N° 2	33
Gráfico N° 3	34
Gráfico N° 4	35
Gráfico N° 5	36
Gráfico N° 6	37

ÍNDICE DE CURVAS.

Curvas del voltaje en el cual se rompe el aislamiento.....	50
Curva N° 1. Representación gráfica de la primera prueba (1galga).....	50
Curva N° 2. Representación gráfica de la segunda prueba (2 galgas).	51
Curva N° 3. Representación gráfica de la tercera prueba (3 galgas).	52
Curva N° 4. Representación gráfica de la cuarta prueba (4 galgas).	52
Curva N° 5. Representación gráfica de la quinta prueba (5 galgas).	53
Curva N° 6. Representación gráfica de la sexta prueba (6 galgas).	54

ÍNDICE DE PANTALLAS.

Pantalla N° 1 Pantalla de programación.	71
Pantalla N° 2 Simulación a 10°C de T.....	71
Pantalla N° 3. Simulación a 38°C de T.....	72
Pantalla N°4. Simulación a 42°C de T.....	72
Pantalla N°5. Simulación a 55°C de T.....	73
Pantalla N° 6. Simulación a 60°C de T.....	73

ÍNDICE DE FOTOS.

Foto 1. Equipo OTS 60XS	74
-------------------------------	----

Foto 2. Calibración de los electrodos.....	74
Foto 3. Colocación de la probeta en el equipo.	75
Foto 4. Primer disparo de prueba.....	75
Foto 5. Segundo disparo de la prueba.	76
Foto 6. Tercer disparo de la prueba.	76
Foto 7. Partes internas de la probeta.....	77
Foto 8. Electrodos.....	77
Foto 9. Probeta.	78
Foto 10. Tapa de la probeta.....	78
Foto 11. Galgas para calibrar los electrodos.	79

INTRODUCCIÓN.

La implementación de un laboratorio de pruebas de rutina de transformadores se hace indispensable para fortalecer el conocimiento adquirido teóricamente, especialmente en carreras técnicas como es el caso de Ingeniería Eléctrica, lo cual se torna un problema ante la inexistencia de equipos de medición, que sirven básicamente para realizar pruebas de rutina a máquinas y equipos eléctricos, etc. Este problema se ha dado por la falta de inversión ya que estos equipos son de un costo muy elevado haciendo difícil su adquisición.

En la actualidad la tecnología ha crecido notablemente, por ende las industrias también se tecnifican creando la necesidad de contratar personal capacitado de cumplir las funciones, que se las encomiende en la parte técnica, lo cual obliga a los nuevos profesionales a prepararse cada vez mejor en cada una de las especialidades.

Esta investigación se halla distribuida de la siguiente manera:

En el Capítulo I se da a conocer las bases teóricas de los transformadores, y especialmente del aceite como aislante y refrigerante. En el Capítulo II se realiza un diagnóstico dentro de la institución a estudiantes de la universidad, con lo cual se determinará el grado de conocimiento del tema propuesto además se interpretará la información recopilada por medio de las encuestas. En el Capítulo III se realiza las pruebas de rigidez dieléctrica al aceite y tabulación de datos de dicha prueba para la obtención de resultados y creación de un simulador.

GLOSARIO DE TÉRMINOS BÁSICOS.

Hidrocarburos parafínicos.- Recordemos que se llama parafinas o hidrocarburos saturados a aquellos que se caracterizan por presentar exclusivamente enlaces simples carbono-carbono.

Hidrocarburos nafténicos.- Es una mezcla líquida de diversos compuestos volátiles muy inflamables de serie homóloga de los hidrocarburos saturados. Se emplea principalmente como disolvente no polar.

Hidrocarburos Aromáticos.- Son compuestos bastante inertes a la hidrogenación.

Polimerización.- La polimerización es un proceso químico por el que los reactivos, monómeros (compuestos de bajo peso molecular) se agrupan químicamente entre sí, dando lugar a una molécula de gran peso, llamada polímero, o bien una cadena lineal o una macromolécula tridimensional.

Catálisis.- La catálisis es el proceso por el cual se aumenta o disminuye la velocidad de una reacción química, debido a la participación de una sustancia llamada catalizador.

Convección.- La convección es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas.

Higroscopia.- Es la capacidad de algunas sustancias de absorber o ceder humedad en el ambiente que se encuentren.

Gradiente.- Indica la dirección en la cual el campo varía más rápidamente y su módulo representa el ritmo de variación de en la dirección de dicho vector gradiente.

El transformador.- Es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, por medio de interacción electromagnética.

Aceite dieléctrico.- Aceite capaz de resistir un gradiente de potencial eléctrico, lo que le confiere propiedades aislantes.

Simulación.- Es la experimentación con un modelo de una hipótesis o un conjunto de hipótesis de trabajo.

Impureza.- Es una sustancia dentro de un limitado volumen de líquido, gas o sólido, que difieren de la composición química de los materiales o compuestos.

Degradación.- La degradación del aceite empieza cuando se abre el envase y permite la entrada de aire. El aire oxida el aceite. Un balde o tambor de aceite abierto y utilizado durante el curso de varios meses será más oscuro al final que al principio. Este nivel de oxidación afecta la apariencia del aceite, pero no afecta su comportamiento.

Refrigeración.- Es el enfriamiento del transformador con la circulación del aceite que se encuentra en su interior.

Aislamiento Externo.- Distancia en aire y superficies de aislamiento sólido en contacto con la atmósfera sometido a esfuerzos eléctricos y a las influencias atmosféricas o de otros agentes externos tales como contaminación, polución, humedad, insectos, etc.

Calidad de energía.- Es el grado de conformidad de las señales electromagnéticas, en un tiempo dado y en un nodo o punto definido, para cumplir con las necesidades de los consumidores, dentro del marco regulatorio del país.

Carga.- La potencia eléctrica requerida para el funcionamiento de uno o varios equipos eléctricos o la potencia que transporta un circuito.

Demanda.- Es el valor promedio de potencia o cantidad relacionada durante un intervalo especificado de tiempo. La demanda se expresa en kilovatios, kilovoltio-amperios, kilovares u otra unidad adecuada. El intervalo puede ser de 5, 15, 30 o 60 minutos.

Falla.- Degradación de componentes. Alteración intencional o fortuita de la capacidad de un sistema, componente o persona para cumplir una función requerida.

Pérdidas técnicas.- Representa la energía que se pierde durante la transmisión dentro de la red y la distribución como consecuencia de un recalentamiento natural de los conductores que transportan la electricidad.

Protección.- Una técnica para evitar daño de los componentes del sistema de distribución eléctrica debido a corrientes excesivas.

Sistema de distribución.- Es la parte del sistema eléctrico cuya función es suministrar energía a un gran número de consumidores, sin limitación de voltaje de alimentación u otra restricción técnica de cualquier naturaleza.

Hidrocarburos.- Son compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno. La estructura molecular consiste en un armazón de átomos de carbono a los que se unen los átomos de hidrógeno.

Hidrocarburos nafténicos.- Un tipo de compuesto orgánico de carbono e hidrógeno que contiene una o más estructuras cíclicas (de anillo) saturadas, o que contiene tales estructuras como una parte importante de la molécula.

Hidrocarburos Parafínicos.- Recibe este nombre el grupo de hidrocarburos que tienen por fórmula general (C_nH_{2n+2}), donde n es el número de átomos. La molécula simple perteneciente a la parafina se crea a través del metano, es un gas que se encuentra a temperatura ambiente.

Prespan.- El prespan es un material aislante en capas, con base de celulosa para la clase A de materiales aislantes.

Viscosidad.- La viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Un fluido que no tiene viscosidad se llama fluido ideal. En realidad todos los fluidos conocidos presentan algo de viscosidad, siendo el modelo de viscosidad nula una aproximación bastante buena para ciertas aplicaciones. La viscosidad sólo se manifiesta en líquidos en movimiento.

CAPÍTULO I

1.1. MARCO TEÓRICO.

1.1.1. Simulación.

Es un intento de modelar situaciones de un problema por medio de un programa de computadora, lo que requiere ser estudiado para ver cómo es que trabaja el sistema.

Tradicionalmente, el modelado formal de sistemas ha sido a través de un modelo matemático, que intenta encontrar soluciones analíticas a problemas que permiten la predicción del comportamiento de un sistema de un conjunto de parámetros y condiciones iniciales.

1.1.2. Aplicación.

Una aplicación es un tipo de programa informático diseñado como herramienta para permitir a un usuario realizar uno o diversos tipos de trabajos. Esto lo diferencia principalmente de otros tipos de programas como los sistemas operativos (que hacen funcionar al ordenador), las utilidades (que realizan tareas de mantenimiento o de uso general), y los lenguajes de programación (con el cual se crean los programas informáticos).

1.1.3. Construcción de los transformadores.

Los transformadores desde el punto de vista constructivo, se encuentran formados por tres parte principales que son: devanado primario, devanado secundario y núcleo.

El núcleo es un circuito magnético, a la vez de ser una estructura para soporte de los devanados, el metal utilizado para su construcción es acero al silicio laminado en hojas de aproximadamente 0.0014 pulgadas de espesor. Estas hojas se apilan para formar los núcleos que son de varias pulgadas de espesor, entre ellos se aplica un

material aislante, por lo general un barniz, para reducir las pérdidas magnéticas y térmicas.¹

En un transformador, las bobinas del primario y del secundario están físicamente enrolladas una sobre otra, la bobina de menor voltaje está situada en la parte interna (más cerca del núcleo). Esta disposición cumple dos objetivos:

- Simplifica el problema del aislamiento del devanado de alto voltaje desde el núcleo.
- Resulta menor flujo disperso en caso de disponer dos devanados en el núcleo, separados.

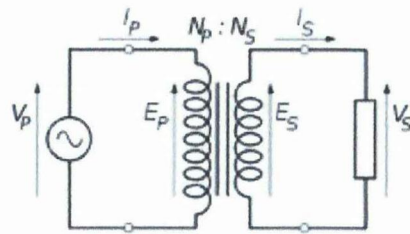
Los transformadores de potencia reciben variedad de nombres, dependiendo de su utilización en los sistemas de potencia. Un transformador conectado a la salida de un generador utilizado para elevar el voltaje hasta niveles de transmisión (110 kV y mayores) a veces se denomina transformador de unidad. El transformador situado en el otro extremo de la línea de transmisión, que reduce el voltaje de los niveles de transmisión a los niveles de distribución (desde 2.3 a 34.5kV), se denomina transformador de subestación o potencia. Por último el transformador que reduce el voltaje de distribución al voltaje final a que se utiliza la potencia (110, 208, 220 V, etc) es llamado transformador de distribución. Todos estos dispositivos son en esencia el mismo, la única diferencia entre ellos es la utilización que se les da.

1.1.4. El transformador ideal.

Un transformador ideal es un dispositivo sin pérdidas con un devanado de entrada y un devanado de salida. Las relaciones entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida,

¹ Walter Miguel Florian Carbonell. El análisis de gases disueltos en aceite mineral dieléctrico como alternativa para el desarrollo de programas de mantenimiento preventivo y predictivo de transformadores trifásicos de potencia. Año 1997

y entre la corriente de entrada y la corriente de salida, están dadas por dos sencillas ecuaciones.



$$\frac{V_p}{V_s} = a$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{1}{a}$$

Vp: voltaje primario.

Vs: voltaje secundario.

Ip: intensidad primario.

Is: intensidad secundaria.

a: relación de transformación

1.1.5. Resumen de la clasificación de tipos de transformadores según su aplicación.



1.1.6. Aislamiento y refrigeración de los transformadores.

Estos dos factores complementan el buen servicio que va a prestar un transformador de acuerdo con el tipo que se adapte a las necesidades requeridas; así pues diremos en primer lugar, que hay tres clases o especies principales de aislamiento que se emplean en los transformadores:

- Gases.
- Líquidos.
- Sólidos.

1.1.6.1. Gases.

El aire es más comúnmente empleado para la refrigeración de los transformadores de construcción seca, pudiendo formarse dicho elemento por medio de sopladores o ventiladores, o bien dejando que penetre por medios naturales. Otros gases empleados son: hidrógeno, nitrógeno y helio.

1.1.6.2. Líquidos.

Los aislantes líquidos se emplean en gran escala para conseguir en los transformadores, aparte de un buen aislamiento, la disipación del calor generado en el servicio, siendo el más empleado el aceite mineral, debido al bajo costo, comparado con los líquidos sintéticos, que solo se emplean para transformadores de grandes potencias o en aquellos que trabajan en lugares peligrosos como refinerías petroleras, fábricas de explosivos, tiros profundos de minas, etc. Debido a su calidad no inflamable en el caso de cortocircuitos internos, son preferidos el aceite mineral para transformador.

1.1.6.3. Sólidos.

Los aislantes sólidos que más se emplean en la construcción o reparación de transformadores, están constituidos por estructuras laminadas de papel, fibra de vidrio, prespan y otras composiciones químicas modernas; las telas barnizadas y de vidrio, así como varias clases de cartones especiales y papeles.

Últimamente se emplean con frecuencia algunos aislantes termoplásticos, cuya rigidez dieléctrica es muy elevada, aun cuando el constructor deberá tener siempre presente que estos materiales son afectados por temperaturas mayores de 110 °C².

1.1.6.4. Rigidez dieléctrica de los aislantes.

En el diseño práctico de transformadores, debe buscarse siempre el equilibrio de las cualidades de los materiales aislantes, pues se debe tener en cuenta que estos van a trabajar en un campo electrostático no uniforme y por lo tanto su rigidez dieléctrica varía de acuerdo con la clase de aislamiento.

En todos los aislantes sólidos la rigidez dieléctrica es afectada muy seriamente por la frecuencia de la corriente, pues si esta se aumenta, la rigidez disminuye de la siguiente forma:

FRECUENCIA Hz	RIGIDEZ DIELECTRICA
60	100 %
120	91%
200	85%
300	81%
400	77%
500	72%

Tabla 1. Rigidez dieléctrica a 100% en 60 ciclos³

² Pedro Camera. Transformadores eléctricos industriales. Reparación diseño y construcción. Noviembre 1974.

³ Pedro Camera. Transformadores eléctricos industriales. Reparación diseño y construcción. Noviembre 1974.

Lo que quiere decir que entre estos límites la rigidez de ruptura en ensayos de un minuto de duración varia inversamente con la frecuencia elevada al exponente 0.173.

En los aislantes líquidos, la rigidez dieléctrica dentro de los límites de la frecuencia que se presenta en la tabla 1 no es afectado.

Para la prueba de rigidez dieléctrica se hace uso de la aplicación de un voltaje en un tiempo determinado, siendo para los aislantes sólidos superiores que para los aceites, pues estos se afectan más fácilmente por el efecto tiempo.

Las normas establecidas para las pruebas de estos aparatos por las asociaciones mundiales de Ingenieros Eléctricos, recomiendan una disminución del tiempo de aplicación en las pruebas con voltaje inducido, cuando la frecuencia de este es superior a 60 ciclos por segundo. Veamos enseguida la tabla relativa a esta prueba.⁴

CICLOS	DURACION EN SEGUNDOS
120 o menos	60
180	40
240	30
360	20
400	18

Tabla 2. Ciclos vs duración en segundos.⁵

⁴ Pedro Camera. Transformadores eléctricos industriales. Reparación diseño y construcción. Noviembre 1974.

⁵ Pedro Camera. Transformadores eléctricos industriales. Reparación diseño y construcción. Noviembre 1974.

1.1.7. Los aceites aislantes en los transformadores.

Para que la capacidad dieléctrica de un aceite para transformador sea tomada como buena, deberá haber pasado la prueba con un voltaje de 22kV. En caso de encontrarse menor resistencia dieléctrica, deberá ser regenerado.

Algunas veces, cuando el aceite no ha pasado satisfactoriamente la prueba anterior, basta con hervirlo en su propio tanque y volver a llevarlo a la prueba, o bien filtrarlo en prensa especial.

Hay que tener presente, que tanto los aisladores como tapas y partes desarmables de los transformadores, deberán protegerse perfectamente contra la entrada de agua o materias extrañas al aceite, para lo cual, deberá emplearse el corcho en planchas, que deberá prensarse perfectamente al apretarse los tornillos, para impedir los elementos señalados.

Cada año por lo menos, deberá sacarse una muestra del fondo de los tanques, para llevarse a prueba de resistencia dieléctrica, esta operación se verifica estando el transformador desconectado y empleándose para el objeto, una probeta de un litro perfectamente seca. Algunas veces, es necesario hacer pruebas con referencia a las filtraciones de aire hacia las cajas de los transformadores, o bien, para localizar algún punto en el que pudiera salirse el aceite, para estos casos se hace uso de un compresor de aire, tapándose perfectamente el transformador e inyectando al interior. En caso de haber algún punto vulnerable, el aire empezará a salir por la parte dañada.⁶

Los aceites aislantes se utilizan en la operación de transformadores, interruptores, reactores, capacitores, motores y otros tipos de equipos eléctricos. Sin embargo el uso

⁶ Pedro Camarena M. Construcción de reguladores de voltaje y pequeños transformadores monofásicos. Noviembre 1981.

más extenso de estos es en los transformadores, es por esta razón que se conocen también como aceites para transformadores.

En los transformadores, un aceite dieléctrico tiene dos funciones básicas. Como primera función actúa como un medio de enfriamiento para disipar el calor generado por el dispositivo, como segunda, se comporta como un aislante eléctrico. Su bajo índice dieléctrico relativo motiva a que tienda a bajar los gradientes de tensión de voltaje de los aislantes sólidos con los que trabaja en serie.

1.1.8. Naturaleza de los aceites aislantes.

Los aceites para transformadores son de naturaleza mineral. Proceden de la destilación fraccionada de petróleos, a la que se sigue un proceso de refinado.

La composición química depende de la procedencia, básicamente se trata de una mezcla compleja de hidrocarburos. Por lo expuesto se comprende que resulte difícil, y que carezca de valor práctico, su análisis químico. Ciertamente y según proporciones de unas u otras moléculas, se habla de aceites con base de parafina o aromática.

La rigidez dieléctrica de los aceites usados es del orden de los 200 kV/cm. Pequeñas cantidades de agua (humedad) o de impurezas, hacen descender aquel valor a una décima parte y aun a menos⁷. De ahí la importancia de su vigilancia y conservación.

El azufre disuelto es un inconveniente, pues ataca al cobre, recubriéndolo de una capa negruzca aislante (eventuales contactos, por ejemplo, en reguladores de voltaje, adquieren resistencias de contacto crecidas que implican calentamientos inadmisibles). Tras el proceso del refino, el aceite tiene menos del 0,2% de azufre.

⁷ Enrique Ras. Transformadores de potencia de medida y de protección. Séptima edición 1991.

1.1.9. Envejecimiento del aceite.

El aceite experimenta un proceso de envejecimiento. Significa que, con el tiempo, se altera, se oxida, forma productos ácidos y pueden llegar a crear lodos. Contribuyen factores varios, siendo los principales: el aire (oxígeno), temperatura (sobrecargas, calentamientos locales, etc.), la luz y las radiaciones ultravioletas (las muestras de aceite se guardan en botellas opacas de plástico, totalmente llenas).

Con el envejecimiento, el aceite empeora en cuanto a características aislantes y refrigerantes, llegando a resultar inservible. Para alargar el proceso, modernamente se emplean, en ocasiones, productos químicos.

La buena conservación del aceite implica evitar sobrecargas fuertes o prolongadas, refrigeraciones inadecuadas (temperaturas ambientes excesivas, cantidades de refrigerante insuficientes).⁸

Una característica importante de estos tipos de materiales es lo que se conoce como la rigidez dieléctrica, que es el valor límite máximo de intensidad de campo eléctrico en la cual el material pierde su propiedad aislante y pasa a ser un conductor. Por ejemplo los aisladores, deben poseer una gran rigidez dieléctrica que determina su grado de confiabilidad y además deben ser capaces de soportar condiciones críticas o extremas de voltaje por breves instantes de tiempo.

1.1.10. Propiedades de los aceites.

Los aceites para usos electrotécnicos deben ser obtenidos por destilación fraccionada del petróleo y oportunamente refinados.

⁸ Enrique Ras. Transformadores de potencia de medida y de protección. Séptima edición 1991.

En estado de pureza poseen una elevada rigidez dieléctrica, ofrecen una gran resistencia a alterarse durante el servicio y no modifican sensiblemente la calidad del material aislante que se halle en contacto con el aceite.

Debe tener el aceite una viscosidad conveniente que facilite en los transformadores el movimiento convectivo para su eficaz enfriamiento, y contribuya en los interruptores al buen funcionamiento de los mismos.

Una característica de gran importancia de los aceites destinados a aparatos que deben funcionar al exterior, es el congelamiento, que ha de tener lugar a la temperatura más baja posible.

Los aceites minerales, que son una mezcla de hidrocarburos, no tienen un punto de congelación bien definido y por ello se ha estimado oportuno considerar la fluidez a baja temperatura, que puede ser valorada por el tiempo que emplea cierta cantidad de aceite, enfriado a determinada temperatura.

La temperatura de inflamabilidad de un aceite, que es la temperatura a la cual emite vapores, los que mezclados con el aire arden en presencia de una llama, no es una característica de importancia fundamental, porque la temperatura normal de funcionamiento del aceite en los aparatos eléctricos es sensiblemente baja y porque, si se forme un arco permanente en el aceite, este podría descomponerse e incendiarse, cualquiera que fuese la temperatura de inflamabilidad.

La aptitud de oponerse a una descarga disruptiva es otra de las propiedades de los aceites aislantes (rigidez dieléctrica), que se determina hallando el voltaje necesario para provocar la descarga eléctrica a través de un cierto espesor de aceite y en determinadas condiciones experimentales. El voltaje que produce esta descarga varía en gran manera, según las condiciones en que se haga la prueba, de la forma y

dimensiones de los electrodos, etc. La producción de la descarga se facilita con la presencia de materiales en suspensión y con la humedad contenida en el aceite.

Las fibras y algunas materias que el aceite contiene en suspensión absorben la humedad, y durante la prueba y con la acción del campo eléctrico se forma una especie de puente entre los electrodos que pueden dar origen a una descarga con un voltaje muy inferior al que correspondería por la efectiva rigidez dieléctrica.

La influencia de la humedad sobre la rigidez dieléctrica del aceite es muy grande, aun para mínima cantidad de aquella.

La prueba de rigidez dieléctrica proporciona, por consiguiente, proyecta una idea del estado de pureza del aceite y presta una gran ayuda en la vigilancia y funcionamiento del que se halla en servicio. Su importancia es menor en los aceites nuevos a su recepción, ya que estos poseen una elevada rigidez dieléctrica cuando salen de las fábricas: secos y filtrados.

Otra propiedad importante del aceite, y fundamental para su buena conservación durante el servicio, es de la resistencia que opone a los fenómenos de oxidación y alteración.

En los transformadores en servicio, con cualquier clase de aceite mineral se observa en mayor o menor grado la formación de copos de color amarillo rojizo, que con el tiempo se consolidan en un deposito oscuro y denso (lodo) que obstruye los canales de circulación del aceite, por cuya razón al ser alteradas la condiciones de enfriamiento, puede ser causa de calentamientos locales muy peligrosos para la conservación de los aislamientos.

Con la formación de estos depósitos y por la influencia del aire, de la humedad, del calor, de la acción catalítica de los metales y probablemente del campo eléctrico, se

verifican en el aceite procesos de oxidación, condensación y polimeración, a consecuencia de los cuales se forman poco a poco compuestos resinosos, ácidos solubles en el aceite caliente, los cuales se transforman a su vez en polímeros de naturaleza asfáltica.

La presencia del aire o del oxígeno favorece la formación de los depósitos referidos, y también el contacto de ciertos metales, especialmente el cobre, debido a la acción catalítica a que da lugar.

El proceso de la formación de depósitos es muy complejo, siendo la causa de que con el tiempo vaya aumentando la acidez del aceite, y ello, unido al calentamiento experimentado, puede dañar a los aislamientos con los que está en contacto, perjudicando así la conservación de los arrollamientos de los transformadores.⁹

1.1.11. Composición química de los aceites.

La materia prima para su elaboración consiste de fracciones de petróleo, obtenidas en una torre de destilación al vacío (50 mm, de Hg) entre los 260 y 371°C las cuales poseen las características físicas adecuadas para su obtención, como son viscosidad, punto de inflamación, peso específico, etc.

Esta materia prima está constituida por hidrocarburos parafínicos, nafténicos y aromáticos además de bajas concentraciones de productos orgánicos de azufre, oxígeno y nitrógeno.

Los compuestos de oxígeno, nitrógeno y azufre son los que proporcionan al aceite su inestabilidad a la oxidación (corrosivos), mientras que todos los componentes, los del tipo aromático juegan el papel principal o más importante.

⁹ Gaudencio ZoppettiJudez. Estaciones transformadoras y de distribución. Cuarta edición.

La cantidad de los diferentes tipos de compuestos depende definitivamente del tipo de crudo refinado y del proceso en sí de refinación.

Los procesos de elaboración básicamente están encaminados a eliminar los compuestos indeseables de la materia prima. Algunos de estos procesos son los de hidrogenación, de ácido sulfúrico y de fulfural.

El fulfural es un solvente selectivo que elimina compuestos polares y aromáticos. Esta eliminación se puede controlar mediante la regulación de aceite.

El método de hidrogenación consiste en el tratamiento del crudo en atmósfera de hidrógeno a alta presión y temperatura en presencia de catalizadores sólidos. Algunos experimentos revelan que con este proceso se obtienen aceites de mejor calidad en cuanto a su contenido de hidrocarburos aromáticos que con otros métodos, se obtienen también contenidos bajos de azufre (alrededor de 0.2-0.5%).

Los crudos para la elaboración de aceites aislantes son de dos tipos, los de base nafténica y de base parafínica. Si un aceite tiene más del 50% de compuestos parafínicos, será mayor que si el crudo es de base parafínica.

El punto de escurrimiento de un aceite de base parafínica estará más cercano a los 0°C, que si el aceite proviene del crudo base nafténica.

En climas muy fríos es recomendable por lo tanto tener en servicio aceites elaborados de un crudo de base nafténica.

Es muy difundido que los aceites que proceden de un crudo de base parafínica presentan una mayor tendencia a gasificarse cuando son sometidos a esfuerzos eléctricos.

Los hidrocarburos aromáticos son más estables desde el punto de vista eléctrico por lo tanto presentan una mejor tendencia a gasificarse. Absorben el hidrogeno liberado por los hidrocarburos saturados y de este modo disminuyen el peligro de gasificación.

Una parte de este grupo de compuestos constituyen los antioxidantes naturales del aceite, pues su reacción de oxidación es autoretardante ya que reaccionan con los peróxidos evitando que continúe su reacción progresiva.

Los compuestos nafténicos o ciclo parafinas hierven a temperaturas más altas de donde se deriva su mayor estabilidad con el aumento de temperatura.

Los corrosivos son hidrocarburos alifáticos que contienen átomos reactivos de azufre capaces de disolver metales catalíticos los que en forma ionizada y soluble promueven la per-oxidación. Casi todos los crudos contienen algunos corrosivos en su constitución y se agregan otros durante la destilación por ruptura de materiales nafténicos del aceite crudo.

Los corrosivos son básicamente de dos tipos:

- Los que reaccionan con Sosa Caustica en el proceso de refinación y pueden ser eliminados por esta sustancia produciendo un aceite neutro.
- Corrosivos que no pueden eliminarse con Sosa y que requieren un tratamiento químico más severo.

En relación a la composición más adecuada para un buen aceite aislante existen diversas opciones respecto a la proporción de cada uno de sus constituyentes, principalmente de los hidrocarburos aromáticos.

Especialistas que durante largo tiempo han estudiado acerca de los aceites aislantes estiman la siguiente composición para un buen aceite aislante.

- Hidrocarburos aromáticos del 18 al 25%
- Hidrocarburos nafténicos del 60 al 65%
- Hidrocarburos parafínicos del 10 al 18%

Empresas dedicadas a la fabricación de transformadores concluyeron después de algunas investigaciones, que un buen aceite aislante debería tener cuando menos un 4% de hidrocarburos aromáticos y óptimamente de 4 del 6%. Además consideran que un porcentaje de 18-25% de hidrocarburos aromáticos sería excesivo ya que habrá problemas de solvencia con algunos materiales dentro del transformador como son lacas, barnices, etc.

Por lo tanto un aceite con las siguientes proporciones es idóneo para operar en un equipo de alto voltaje.

- Hidrocarburos aromáticos del 4.5 al 6%
- Hidrocarburos nafténicos del 56 al 60%
- Hidrocarburos parafínicos del 35 al 40%¹⁰

1.1.12. Características de los aceites aislantes.

Cada material tiene su propia rigidez dieléctrica, pero su valor depende de las dimensiones de los electrodos de ensayo, de las condiciones ambientales en las cuales se realiza la prueba, y la duración en tiempo del voltaje aplicado.

La humedad reduce fuertemente el valor de rigidez dieléctrica y los aislantes son tanto más eficaces cuanto menos higroscópicos son.¹¹

¹⁰ Augusto Jesús Lora Rubiños. Diseño de un generador de impulso de alta tensión basado en las normas ASTM-D 3426 e IEC-60243-3 para ensayos de rigidez dieléctrica de materiales polímeros y sólidos. Año 2008.

Los aceites aislantes son producto de la destilación fraccionada del petróleo crudo, obtenidos de tal manera que reúnan las características físicas y las propiedades eléctricas adecuadas para su utilización en diversos equipos.

Por este motivo debe tener:

- Alta resistencia dieléctrica.
- Libre de ácidos inorgánicos álcalis y azufre (para evitar el daño al aislamiento de los conductores).
- Baja viscosidad (para transferir bien el calor).
- Buena resistencia a la emulsificación (para evitar el peligro que ocasiona el agua en suspensión).
- Que no cree lodos en condiciones normales de operación.
- Tener alto punto de inflamación.
- Ser compatible con los materiales usados en la construcción del transformador.

¹¹ Augusto Jesús Lora Rubiños. Diseño de un generador de impulso de alta tensión basado en las normas ASTM-D 3426 e IEC-60243-3 para ensayos de rigidez dieléctrica de materiales polímeros y sólidos. Año 2008.

La alteración de algunas de estas características se refleja cuando se somete el aceite a la prueba de rigidez dieléctrica.

Densidad	a 15°C valor máximo 0,890
	a 20°C valor máximo 0,887
Viscosidad	a 20°C valor máximo 30 c St
	a -30°C valor máximo 1800 c St
Punto de inflamación	valor mínimo 140°C
Cenizas	Inapreciables
Azufre corrosivo	Exento
Acidez (N° de neutralización)	0.05mg KoH/gr.
Índice de saponificación	valor máximo 0,10mg KoH/g de aceite
Rigidez dieléctrica	30 kV/mm.
Contenido de agua, máximo	35 p.p.m.
Color	Casi blanco agua
Reacción	Neutral
Numero de precipitación	Cero
Numero de emulsión en vapor (seg)	15 max
Temperatura de combustión	125 ° C
Calor específico	0.488
Peso por galón	7.5 libras

Tabla 3. Características principales de un aceite aislante.¹²

1.1.12.1. Viscosidad.

La baja viscosidad del aceite aislante en todo el rango de temperaturas a las que puede estar sometido el equipo, es una condición fundamental que debe asegurar la

¹² Iván Mauricio Robalino Soto. Vida útil del transformador. Año 1998.

circulación adecuada y el flujo expedito del líquido dentro del equipo, disipado el calor producido en él.

Temperatura °C	Viscosidad dinámica (N.seg/m²)	Viscosidad cinemática (m²/seg)
0	55,24	67,5
10	33,45	37,8
20	21,1	24
30	13,44	15,4
40	9,36	10,8

Tabla 4. Viscosidad del aceite de acuerdo a la temperatura.¹³

1.1.12.2. Contenido de aire.

La solubilidad de los gases en los aceites minerales es directamente proporcional a la presión parcial del agua en la superficie, a una presión determinada. Para los aceites normales, la saturación se obtiene con aproximadamente el 10% en volumen y varía muy poco con la temperatura.

El aire disuelto en el aceite no afecta las características dieléctricas, pero si se formase una burbuja en la aislación, se producirá una deformación del campo electrostático que puede llegar a provocar la ruptura del dieléctrico.

Además el envejecimiento de la aislación se acelera con el oxígeno contenido en el aire disuelto en el aceite.

¹³ Pedro Reis Tenajas. Análisis del envejecimiento de un transformador mediante espectroscopia dieléctrica medida en baja frecuencia.

1.1.12.3. Rigidez dieléctrica.

A diferencia de los materiales ferromagnéticos que pueden ser sometidos a elevados valores de inducción sin que se alteren sus características estructurales, en un aislante inmerso en un campo eléctrico, este puede ser soportado hasta un cierto límite, más allá del cual se verifica el fenómeno de descarga, con pérdida permanente o temporal (descargas parciales) de las cualidades del aislante.

La descarga puede ser autoregenerativa (aislamientos en aire o aceite) o no autoregenerativa, cuando se produce un daño irreversible del aislante.

Se denomina rigidez dieléctrica de un determinado material, al gradiente de campo eléctrico máximo que puede soportar.

Su valor se puede determinar experimentalmente mediante los procedimientos e indicaciones establecidos por normas.

En la práctica el voltaje de ruptura es el valor de referencia que más fácilmente se obtiene.

La rigidez dieléctrica es influenciada por el contenido de agua del aceite y por la contaminación por fibras de celulosa, por lo que sus valores dan una buena indicación de la calidad del aceite. Sin embargo, no representa ninguna indicación acerca del envejecimiento, y así un aceite muy envejecido puede alcanzar altos valores de rigidez dieléctrica.

1.1.12.4. Factor de potencia y resistencia específica.

Son valores que caracterizan la calidad del aceite como fluido dieléctrico.

Las variaciones de sus valores en el tiempo son una indicación del cambio en las propiedades eléctricas del aceite o de la aislación sólida, haciendo las correcciones por temperatura que sean pertinentes.

En la práctica, los valores de la medida de cualquiera de los factores sirven para evaluar la calidad de un aceite, siendo más confiable la medida del factor de potencia.

1.1.12.5. Acidez.

La presencia de ácidos indica envejecimiento acelerado del aceite. Los ácidos libres se miden en los mg.deKoH necesarios para neutralizar 1 gramo de aceite (índice de neutralización). Se usa también el índice de saponificación que indica los ácidos libres y en combinaciones y que también se miden en mg. KoH/gr.

1.1.12.6. Sedimentos.

La presencia de sedimentos en el aceite es una manifestación evidente de un avanzado estado de envejecimiento, al punto que ya es dudoso el poder recuperarlo mediante tratamiento de regeneración. Previamente a la formación de sedimentos, se observa un aumento en el índice de neutralización, de donde se deduce que es necesario llevar un control de estos valores para poder recuperar oportunamente el aceite.

1.1.12.7. Tensión interfacial.

La tensión interfacial entre el aceite aislante y el agua es el valor de la fuerza de atracción entre las moléculas de los dos líquidos, medida en la superficie de contacto, y se expresa en dinas por centímetro (o milinewtons por metro).

Esta prueba permite detectar la presencia de contaminantes solubles polarizados y de productos del deterioro de los aislamientos sólidos, con los cuales la tensión interfacial disminuye.¹⁴

1.1.13. Pérdida de las características de los aceites aislantes.

1.1.13.1. Presencia de humedad.

La humedad en el aceite y en los devanados se presenta en suspensión o en solución.

En el primer caso no se mezcla en forma molecular con el aceite, pero ioniza los ácidos compuestos propios del aceite ocasionado en esta forma que baje su poder dieléctrico.

Por otra parte, el agua en solución que se mezcla con el aceite, tiene normalmente una concentración de 0.002% y el punto de saturación es de 0.005%.¹⁵

Aun a la concentración del punto de saturación, el agua no influye en el poder dieléctrico del aceite, pero si la temperatura del equipo desciende, la humedad en la solución se precipita formando una suspensión que si puede influir en el poder dieléctrico.

Lo anterior indica que la presencia de pequeñas cantidades de agua en el aceite y en los devanados (cuyos aislamientos están impregnados de aceite), origina que decrezcan considerablemente sus propiedades como aislante.

¹⁴ Julio Cesar Corrales León. Pruebas para instalación puesta en servicio operación y mantenimiento de transformadores de potencia. Año 1999.

¹⁵ Alejandro Aldas Saltos. Proyecto de norma para pruebas de transformadores.

1.1.13.2. Oxidación.

Al combinarse el oxígeno del aire con el aceite se forman ácidos, dióxidos de carbono, peróxidos y un sedimento formado por productos gomosos con partes granuladas.

El dióxido de carbono escapa, y la parte en solución no afecta la composición del aceite. Los peróxidos son inestables y suelen descomponerse devolviendo el oxígeno, pero de cualquier forma no deterioran la composición básica del aceite ni sus propiedades.

El efecto más dañino de la oxidación del aceite es la formación de ácidos orgánicos, que atacan los aislantes y que combinan con el propio aceite. Los primeros compuestos formados por la reacción de los ácidos con el aceite, permanecen en solución y los siguientes se van precipitando formando el llamado sedimento.

La rapidez con que se oxida un aceite, depende de su temperatura y existe aproximadamente la relación del doble de oxidación por cada 10°C de aumento de temperatura.¹⁶

Los ácidos formados en el aceite atacan directamente los aislamientos hechos a base de celulosa, papel cartón y materiales orgánicos similares, los cuales van perdiendo poco a poco sus características. En resumen puede decirse que la presencia de ácidos en el aceite aislante acorta la vida de los aislamientos y por consiguiente la de los transformadores.

1.1.13.3. Contaminación.

La contaminación del aceite suele ser accidental, por ejemplo puede suceder al manejarlo con mangueras de hule, o ponerlo en contacto con otros materiales o sustancias solubles en el aceite.

¹⁶ Alejandro Aldas Saltos. Proyecto de norma para pruebas de transformadores.

Podemos considerar también como una contaminación la formación de pequeñas partículas de carbón al producirse un arco eléctrico dentro del aceite como consecuencia de una falla de aislamiento. Estas partículas de carbón en suspensión bajan el poder dieléctrico del aceite.¹⁷

1.1.14. Criterios de aceptación o rechazo de una prueba de resistencia de aislamiento.

Existen varios criterios para aceptar o rechazar una prueba de resistencia de aislamiento. Estos estarán establecidos por el fabricante, dependiendo de su experiencia y posibilidad de extracción de humedad en los transformadores.

A continuación se presenta una tabla donde se indican los valores mínimos de aceptación de resistencia para cada clase de aislamiento de acuerdo al criterio de aceptación de fabricantes de transformadores.

Dicho criterio establece que los valores del índice de absorción de 1.4 o mayor, son indicativos de buenas condiciones del aislamiento.¹⁸

Condición del aceite	Valor de rigidez dieléctrica permisible
Aceites degradados y contaminados	10 a 20 kV
Aceites carbonizados no degradados	20 a 33 kV
Aceite nuevo sin desgasificar	33 a 40 kV
Aceite nuevo desgasificado	40 a 50 kV
Aceite regenerado	50 a 60 kV

Tabla 4. Valores permisibles de rigidez dieléctrica según condición de aceite.¹⁹

¹⁷ Alejandro Aldas Saltos. Proyecto de norma para pruebas de transformadores.

¹⁸ Pedro Avelino Pérez. Transformadores de distribución. Teoría, cálculo, construcción y pruebas. Año 2008.

¹⁹ Santiago Enrique Medina Valarezo. Pruebas en aceites aislantes. Año 2006

Resistencia mínima de aislamiento de un transformador en aceite a 20°C, 1 minuto y 1000 volts de prueba			
clase de aislamiento kV	Megohms	clase de aislamiento kV	Megohms
1,2	32	92	2480
2,5	68	115	3100
5	135	138	3720
8,7	230	161	4350
15	410	196	5300
25	670	230	6200
34,5	930	287	7750
46	1240	345	9300
69	1860		

Tabla 5. Valores mínimos de aislamiento recomendado en transformadores sumergidos en líquidos aislantes. ²⁰

²⁰ Pedro Avelino Pérez. Transformadores de distribución. Teoría, cálculo, construcción y pruebas. Año 2008.

CAPÍTULO II

2.1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se realiza un análisis de los datos obtenidos de las encuestas aplicadas a los estudiantes de octavo semestre de la carrera de Ingeniería Eléctrica, con lo cual se pretende corroborar la necesidad de implementar un laboratorio en donde se puede realizar pruebas de aceite utilizado en máquinas eléctricas. Además se realizarán dichas pruebas utilizando los electrodos del equipo a diferente distancia para determinar a qué nivel de voltaje el aceite pierde sus propiedades dieléctricas y analizar los resultados obtenidos.

2.2. Método de estudio.

Se realizó un estudio analítico y descriptivo con el objeto de establecer la necesidad de crear un laboratorio de pruebas de transformadores en la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.3. Técnicas e instrumentos.

Como instrumento de investigación utilizado lo constituyó un cuestionario de 6 preguntas que consta con ítems de respuesta según la pregunta, para que el cuestionario se haga más didáctico, entendible y rápido al momento de responder.

El cuestionario va direccionado específicamente a los estudiantes de octavo semestre de la carrera de Ing. Eléctrica, el cual se trata de un cuestionario enfocado al conocimiento que tienen los estudiantes sobre las pruebas de rigidez dieléctrica de aceites para máquinas eléctricas, y la utilización y manipulación del equipo para dichas pruebas.

En el cuestionario consta interrogantes sobre las propiedades, envejecimiento, como manipular el equipo etc.

2.4. Programas que se dan a conocer para la elaboración del simulador.

Lenguaje C. es un lenguaje de programación de propósito general que ofrece economía sintáctica, control de flujo y estructuras sencillas y un buen conjunto de operadores. No es un lenguaje de muy alto nivel y más bien un lenguaje pequeño, sencillo y no está especializado en ningún tipo de aplicación. Esto lo hace un lenguaje potente, con un campo de aplicación ilimitado y sobre todo, se aprende rápidamente. En poco tiempo, un programador puede utilizar la totalidad del lenguaje.

Visual Basic. Actualmente, los programas creados en Visual Basic sólo funcionan en Windows. La aplicación Visual Basic, permite crear ventanas, botones, menús, etc. de forma sencilla con solo arrastrar y soltar los elementos. Luego se pueden definir las apariencias, posiciones y comportamientos tanto de forma visual como utilizando códigos de programación.

Este lenguaje toma elementos de diferentes paradigmas como el orientado a objetos y el orientado a eventos.

Visual Basic suele considerarse un sistema RAD (Rapid ApplicationDevelopment), porque permite crear aplicaciones de forma rápida, especialmente para prototipos.

Matlab. (Abreviatura de *matrixlaboratory*, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Mac OS X.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

2.5. Resultados y análisis de la encuesta aplicada a los estudiantes de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Encuesta aplicada a los estudiantes de octavo semestre de ingeniería eléctrica.

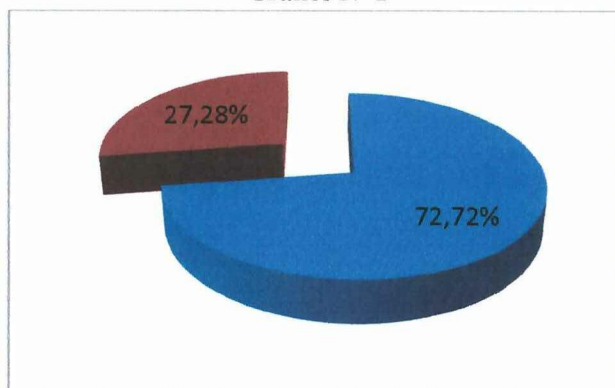
1.- *¿Conoce usted que es una simulación?*

Tabla N° 6. Pregunta 1

PREGUNTA 1		
SI	24	72,72%
NO	9	27,28%

Elaborado por los investigadores

Grafico N° 1



Elaborado por los investigadores

De acuerdo a la pregunta: la simulación es un concepto conocido por los estudiantes ya que ésta utiliza modelos matemáticos y lógicos para su programación mediante software.

2.- *¿Cuáles son los software para realizar simulaciones con los que está familiarizado?*

a) *Visual Basic*

b) C++

c) MatLab

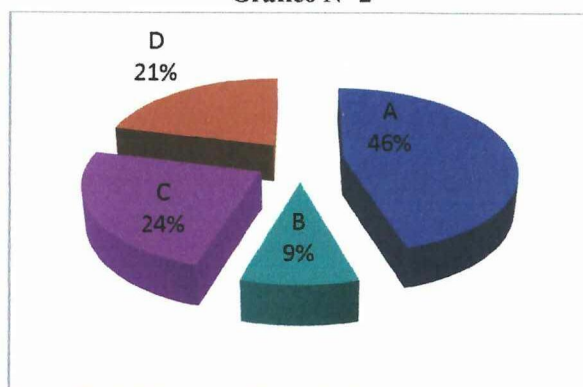
d) Ninguna

Tabla N° 7. Pregunta 2

PREGUNTA 2		
A	15	45,45%
B	3	9,1%
C	8	24,24%
D	7	21,21%

Elaborado por los investigadores

Grafico N° 2



Elaborado por los investigadores

De acuerdo a la pregunta: El 46% de los estudiantes está familiarizado con Visual Basic, lo que nos permite elegir este lenguaje de programación como el más idóneo para la realización de la simulación, dicho software posee herramientas fáciles para su utilización y desarrollo.

3.- ¿Conoce usted cuales son los tipos de aislamientos más usados en transformadores de distribución?

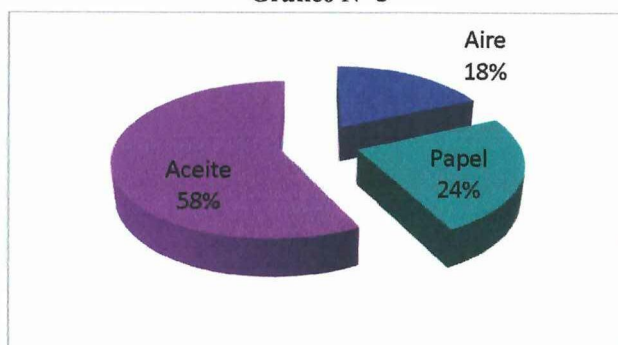
- a) Vacío
- b) Papel
- c) Aceite

Tabla N° 8. Pregunta 3

PREGUNTA 3		
Aire	6	18,18%
Papel	8	24,24%
Aceite	19	57,58%

Elaborado por los investigadores

Gráfico N° 3



Elaborado por los investigadores.

De acuerdo a la pregunta: El 57,58% de los encuestados concuerdan que la mayoría de transformadores son aislados por aceite dieléctrico, el mismo que proporciona un adecuado aislamiento para el trabajo de los transformadores de distribución, debido a esto existe la necesidad de realizar pruebas que muestren su deterioro en el transcurso del tiempo para conocer su vida útil.

4.- ¿Qué tipo de transformadores son los más utilizados en distribución residencial?

a) Monofásico

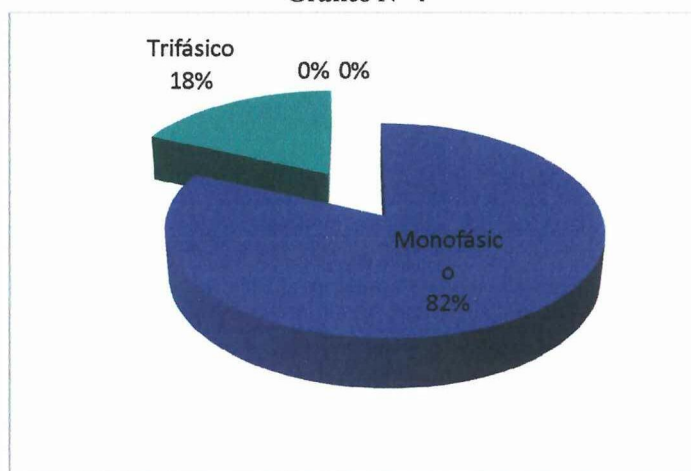
b) Trifásico

Tabla N° 9. Pregunta 4

PREGUNTA 4		
Monofásico	27	81,81%
Trifásico	6	18,19%

Elaborado por los investigadores

Gráfico N° 4



Elaborado por los investigadores

De acuerdo a la pregunta: El 82% de los alumnos encuestados tienen conocimiento sobre los transformadores monofásicos que se utilizan en distribución residencial, debido a que el constante crecimiento de las zonas residenciales hacen que se requieran cada vez más transformadores de este tipo.

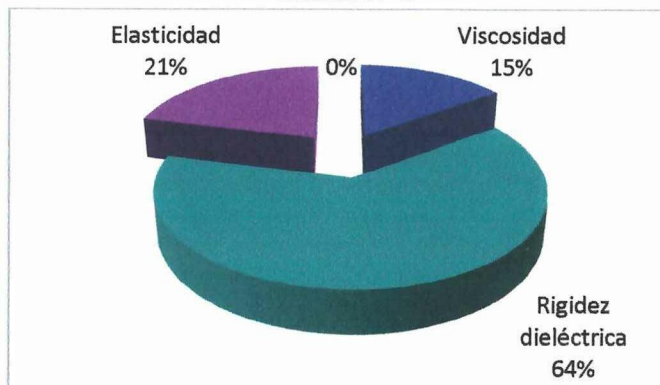
5.- ¿Conoce usted cual es la principal características de los aceites utilizados en los transformadores?

Tabla N° 10 Pregunta 5.

PREGUNTA 5		
Viscosidad	5	15,15%
Rigidez dieléctrica	21	63,64%
Elasticidad	7	21,21%

Elaborado por los investigadores

Gráfico N° 5



Elaborado por los investigadores

De acuerdo con la pregunta: El 64% de los encuestados concuerda que la rigidez dieléctrica es una de las características más importantes de los aceites aislantes que se encuentran en los transformadores, si esta característica se ve deteriorada puede causar grandes daños en los transformadores.

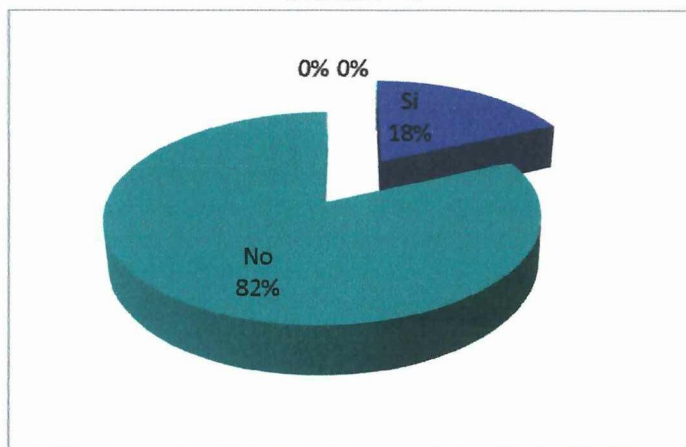
6.- ¿Tiene conocimiento sobre pruebas de rigidez dieléctrica?

Tabla N° 11 Pregunta 6

PREGUNTA 6		
SI	6	18,20%
NO	27	81,80%

Elaborado por los investigadores

Gráfico N° 6



Elaborado por los investigadores

De acuerdo con la pregunta: El 82% de los estudiantes desconocen sobre las pruebas de rigidez dieléctrica que se realizan en los aceites de los transformadores, pero se tienen el fundamento básico para que mediante un equipo se realicen prácticas de laboratorio.

Bajo este análisis se ve la necesidad de proveer a la Universidad de un equipo de pruebas de rigidez dieléctrica para afianzar los conocimientos básicos a través de la práctica.

2.6. Enunciado de la hipótesis.

¿La simulación y aplicación de pruebas de rigidez dieléctrica del aceite nos permitirá realizar análisis con los datos arrojados por el equipo, y además se podrá determinar el voltaje de ruptura del aislante?

2.7. Hipótesis nula (H₀).

La simulación y aplicación de pruebas de rigidez dieléctrica del aceite no nos permitirá realizar análisis con los datos arrojados por el equipo, y además se podrá determinar el voltaje de ruptura del aislante.

2.8. Hipótesis alternativa (H₁)

La simulación y aplicación de pruebas de rigidez dieléctrica del aceite si nos permitirá realizar análisis con los datos arrojados por el equipo, y además se podrá determinar el voltaje de ruptura del aislante.

2.9. Tabulación de encuestas aplicadas a los estudiantes de octavo semestre de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Nº	SI	NO	TOTAL
1	24	9	33
2	26	7	33
3	33	0	33
4	27	6	33
5	26	7	33
6	6	27	33

Elaborado por los investigadores

2.10. Resumen de frecuencias observables f(o).

N°	FRECUENCIAS	OBSERVABLES	TOTAL
	SI	NO	
1	24	9	33
2	26	7	33
3	33	0	33
4	27	6	33
5	26	7	33
6	6	27	33
TOTAL	142	56	198

Elaborado por los investigadores

2.11. Resumen de frecuencias esperadas (Fe)

$$fe = \frac{tf * tc}{tg}$$

$$fe = \frac{33 * 142}{198}$$

$$fe = \frac{33 * 56}{198}$$

$$fe = 9,3$$

N°	FRECUENCIAS ESPERADAS	
	SI	NO
1	23,66	9,3
2	23,66	9,3
3	23,66	9,3
4	23,66	9,3
5	23,66	9,3
6	23,66	9,3

Elaborado por los investigadores

CALCULO DEL χ^2

$$\chi^2 = \frac{(fo - fe)^2}{fe}$$

No	f_o	f_e	$f_o - f_e$	$(f_o - f_e)^2$	$\chi^2 = \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e}$
1	24	23,66	0,4	0,16	0,006
2	26	23,66	2,4	5,76	0,24
3	33	23,66	9,4	88,36	3,73
4	27	23,66	3,4	11,56	0,48
5	26	23,66	2,4	5,76	0,24
6	6	23,66	-17,6	309,76	13,12
7	9	9,3	-0,3	0,09	0,009
8	7	9,3	-2,3	5,29	0,56
9	0	9,3	-9,3	86,49	9,3
10	6	9,3	-3,3	10,89	1,17
11	7	9,3	-2,3	5,29	0,56
12	27	9,3	17,7	313,29	33,68

TOTAL 63,09

Elaborado por los investigadores

$f_o = \text{frecuencia observada}$

$f_e = \text{frecuencia esperada}$

$tf = t. \text{fila}$

$tc = T. \text{columna}$

$tg = T. \text{general}$

$gl = \text{grados de libertad}$

$gl = (mf - 1) * (n - c1)$

$gl = (6 - 1) * (2 - 1)$

$gl = 5 * 1$

$gl = 5$

$xt^2 \rightarrow R = 11,1$

$Xc^2 = 63,09$

Como $xt^2 < xc^2$

$11,1 < 63,09$

Una vez determinada el xt^2 y el xc^2 ; establece que el xt^2 (11,1) es menor que el xc^2 (63,09); por lo tanto se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1) que dice:

“La simulación y aplicación de pruebas de rigidez dieléctrica del aceite si nos permitirá realizar análisis con los datos arrojados por el equipo, y además se podrá determinar el voltaje de ruptura del aislante.”

CAPÍTULO III

3.1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se implementara un programa el cual se utilizará para la tabulación y presentación de datos obtenidos al realizar las pruebas de rigidez dieléctrica del aceite, utilizando el equipo de marca MEGGER OTS 60 XS, el mismo que permite establecer el nivel de voltaje en el aceite y sus propiedades como aislante. Además se utilizarán gráficas y curvas para el análisis de resultados.

3.2. Justificación de la propuesta.

La rigidez dieléctrica es una medida de la capacidad del aceite para soportar sollicitaciones eléctricas. La medida de la rigidez dieléctrica, sirve principalmente para indicar la presencia de contaminantes como agua o partículas.

Un valor bajo de rigidez dieléctrica puede indicar que uno o más de estos contaminantes están presentes. Sin embargo, un valor elevado de rigidez dieléctrica no indica necesariamente la ausencia de todo contaminante.

Esta prueba generalmente es utilizada para transformadores en subestaciones de distribución y potencia, principalmente para su fabricación y mantenimiento.

Este trabajo pretende constituirse en un instrumento de análisis y reflexión para los estudiantes y docentes de la Universidad Técnica de Cotopaxi de la carrera de Ingeniería Eléctrica, ya que como futuros profesionales en el sector eléctrico necesitarán de una guía en cuanto a la operación, uso y mantenimiento de los transformadores de distribución y sus seguridades, en especial a las pruebas que son sometidos.

3.3. OBJETIVOS.

3.3.1. Objetivo general.

- Simular y aplicar las pruebas referentes a la rigidez dieléctrica del aceite para transformadores hasta 15kV, mediante la utilización del medidor de rigidez dieléctrica OTS 60 SX, para determinar la condición operativa del aceite en un transformador.

3.3.2. Objetivos específicos.

- Realizar las pruebas de rigidez dieléctrica en el equipo OTS 60XS para obtener datos.
- Elaborar un programa que permita mostrar la condición del aceite mediante el ingreso de datos de temperatura y color del aceite.

3.4. Alcance de la investigación.

La presente investigación se centra en obtener la rigidez dieléctrica de un aceite aislante de transformadores, con la utilización del equipo megger OTS60SX, para el Laboratorio de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con la finalidad de establecer parámetros de uso del aceite, tomando en cuenta diferentes aspectos como por ejemplo, los años de uso, su color, su acidez, etc., y así poder contribuir a la correcta utilización del aceite, alargando la vida útil de los transformadores y evitando también impactos ambientales.

Descripción del equipo a utilizar.

El OTS 60 SX es un instrumento para la prueba de resistencia dieléctrica, semiautomático y de peso liviano.

El instrumento es apropiado para el uso en campo protegido y puede ser impulsado a través de una gama de suministros de la red.

La salida máxima es de 60 kV, permite realizar pruebas en aceite procedente de una amplia variedad de instalaciones eléctricas incluidos transformadores, disyuntores y equipos parecidos.

Una selección de recipientes permite configurar el instrumento para una variedad de pruebas. El funcionamiento semiautomático del instrumento permite realizar todos los tipos de pruebas.

Un temporizador de un minuto automático funciona cuando se interrumpe el alto voltaje para la prueba de resistencia.

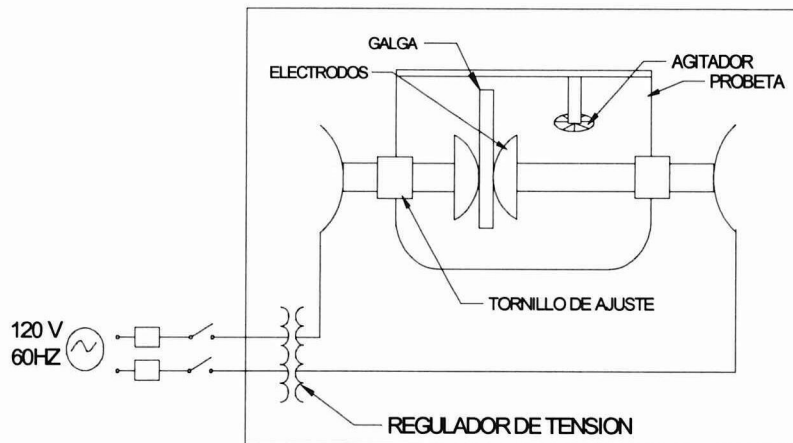
Las muestras de aceite también pueden probarse de acuerdo con la especificación de descomposición utilizando una frecuencia de pruebas adecuada.

El instrumento está construido dentro de una recia caja de chapa de acero el aparato incorpora asas para facilitar su transporte.

Partes del equipo.

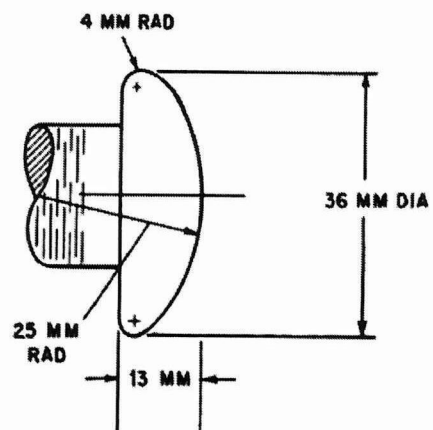
A continuación se presenta las partes del equipo a utilizar en la prueba.

Grafico N° 11. Esquema del equipo a utilizar en las pruebas de aceite, (OTS 60SX)



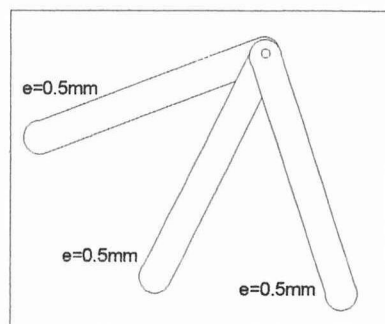
Elaborado por los investigadores.

Grafico N° 12. Características de los electrodos.



Elaborado por los investigadores.

Grafico N° 13. Características de galgas



Elaborado por los investigadores.

3.5. Procedimiento de la prueba.

A continuación se presenta los pasos a seguir para utilizar el equipo de medición megger OTS 60SX, en el cual se realizara las pruebas de rigidez dieléctrica del aceite.

- Agitar suavemente el recipiente que contiene la muestra a ensayar, para asegurar un reparto más homogéneo de las impurezas, sin provocar la formación de burbujas de aire.
- Calibrar los electrodos que se encuentran en la probeta a 3mm de separación entre ellos.
- Verter una pequeña cantidad de aceite sobre los electrodos, enjuagar la cubeta y escurrirla.
- Llenar la cubeta con el aceite a ensayar, evitando que se formen burbujas de aire, hasta un nivel de unos 10 mm por encima de la parte superior de los electrodos.
- Dejar reposar el aceite durante tres minutos antes de realizar el primer disparo.
- Seleccionar la norma con la cual se va trabajar en el equipo que es D1816 que va de 0,5 kV/s.
- Iniciar el primer disparo.

- Una vez que ya termine el proceso, tomar datos y se deja reposar nuevamente 3 minutos y se realiza el segundo disparo.
- Se realiza tres disparos con el mismo intervalo de tiempo.
- Luego que se obtienen los datos de los tres disparos, se suman y se dividen para tres, siendo la respuesta de la prueba.

La norma D1816 seleccionada en el equipo al momento de la prueba, es por las características de los electrodos que se van utilizar, ya que las otras dos normas existentes en el equipo corresponden a otro tipo de electrodos que son: planos y cilíndricos a la norma ASTM D877. Los electrodos que corresponden a la norma utiliza son de forma cóncava, lo cual permite al momento de la prueba, la ruptura de la resistencia en el aceite se lo haga de una forma más óptima con respecto a los otros dos electrodos.

Cabe recalcar que el equipo fue obtenido únicamente con los electrodos utilizados en la prueba.

3.6. Introducción de Visual Basic, programa que será utilizado para la simulación.

Visual Basic es un lenguaje de programación orientado a objetos que se puede considerar una evolución de Visual Basic implementada sobre el framework .NET. Su introducción resultó muy controvertida, ya que debido a cambios significativos en el lenguaje VB.NET no es compatible hacia atrás con Visual Basic, pero el manejo de las instrucciones es similar a versiones anteriores de Visual Basic, facilitando así el desarrollo de aplicaciones más avanzadas con herramientas modernas.

La gran mayoría de programadores de VB.NET utilizan el entorno de desarrollo integrado Microsoft Visual Studio en alguna de sus versiones (desde el primer Visual

Studio .NET hasta Visual Studio .NET 2012, que es la última versión de Visual Studio para la plataforma .NET).

Al igual que con todos los lenguajes de programación basados en .NET, los programas escritos en VB .NET requieren el Framework .NET o Mono para ejecutarse.

Framework.

Son diseñados con la intención de facilitar el desarrollo de software, permitiendo a los diseñadores y programadores pasar más tiempo identificando requerimientos de software que tratando con los tediosos detalles de bajo nivel de proveer un sistema funcional. Por ejemplo, controlar un puerto en paralelo (puerto serial de la PC), es un programa que permite visualizar el estado de los pines del puerto paralelo con el monitor sin necesidad de tener un circuito electrónico preparado o conectado al puerto paralelo. Con este programa podemos simular el funcionamiento de cualquier aplicación desarrollada para interactuar con el puerto paralelo. Ejecutando el programa desarrollado en Visual Basic realizamos el encendido y apagado de distintos pines, el cual funciona correctamente.

3.7. Desarrollo de la propuesta.

Esta prueba muestra la presencia de agentes contaminantes (agua, polvo, partículas conductoras) en el aceite, lo cual puede ser representativo si se presentan valores bajos de rigidez. Cuando un aceite está muy contaminado tiende a presentar valores bajos de rigidez los cuales disminuyen el aislamiento del transformador.

La prueba consiste en aplicar un voltaje de C.A., entre dos electrodos sumergidos en aceite a una distancia de 2,0 mm o 2,5 mm según norma ASTM D1816 o ASTM D877, respectivamente.

El valor del voltaje en kilovoltios a la que se presenta la descarga entre los electrodos se le conoce como rigidez dieléctrica y como norma general es el promedio del resultado de 3 pruebas, cada una en un intervalo de 3 minutos, permitiendo que el aceite a prueba se estabilice, según norma D1816.

Las normas utilizadas y los valores límites permitidos para esta prueba son las siguientes según el equipo OTS 60SX:

ASTM D-877 Electrodo planos separados 2,5 mm.

ASTM D-1816 Electrodo semiesféricos separados 2,0 mm

A continuación se presentan los datos permisibles según normas.

Tabla N°16. Valores de rigidez dieléctrica según norma.

NORMA	VALOR DE RIGIDEZ DIELECTRICA [kV/cm]
ASTM D 877	Aceites usados: 25 kV mínimo
	Aceites nuevos: 35 kV mínimo
ASTM D 1816	Aceites usados: 20 kV mínimo
	Aceites nuevos: 30 kV mínimo

Elaborado por los investigadores.

Tabla N°17. Condiciones del aceite según valores de rigidez dieléctrica.

CONDICIONES DEL ACEITE	VALOR DE RIGIDEZ DIELÉCTRICA PERMISIBLE [kV/cm]
Desastroso	10 a 20 kV
Muy malo	20 a 33 kV
Malo	33 a 40 kV
Marginal	40 a 50 kV
Bueno	50 a 60 kV

Elaborado por los investigadores.

Curvas del voltaje en el cual se rompe el aislamiento.

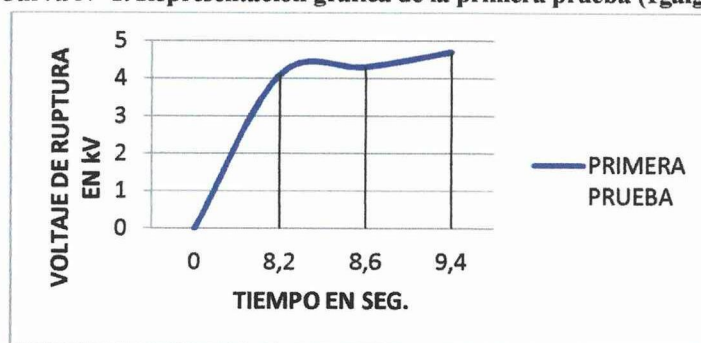
Las curvas que se dan a continuación se realizan con diferentes distancias entre electrodos al momento de realizar las pruebas, a una temperatura de 16°C, para determinar el comportamiento del aceite sometido a prueba, y adquirir valores que representen a cada separación, obteniendo una distancia promedio, para una prueba confiable. Estas distancias se calibran con la utilización de galgas, cada galga tiene un espesor de 0.5 mm.

Tabla N° 16. Datos de la primera prueba. (1 galga)

N° DE DISPAROS	VALORES EN KV	DISTANCIA EN mm	TIEMPO ENTRE DISPAROS
Primer disparo	4,1	0.5 mm	3 minutos
Segundo disparo	4,3	0.5 mm	3 minutos
Tercer disparo	4,7	0.5 mm	3 minutos

Elaborado por los investigadores.

Curva N° 1. Representación gráfica de la primera prueba (1galga)



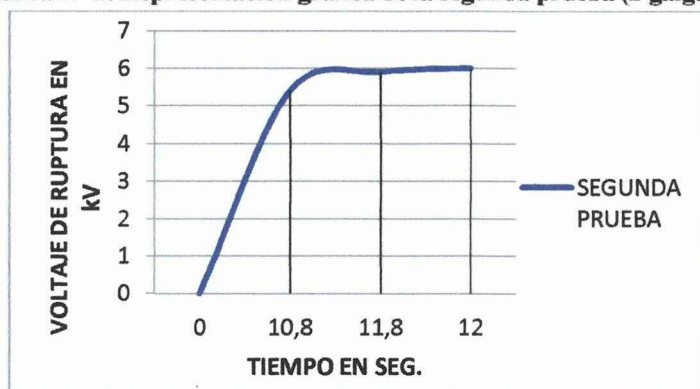
Elaborado por los investigadores

Tabla N° 17. Datos de la segunda prueba.(2 galgas)

N° DE DISPAROS	VALORES EN KV	DISTANCIA EN mm	TIEMPO ENTRE DISPAROS
Primer disparo	5,4	1 mm	3 minutos
Segundo disparo	5,9	1 mm	3 minutos
Tercer disparo	6	1 mm	3 minutos

Elaborado por los investigadores

Curva N° 2. Representación gráfica de la segunda prueba (2 galgas).



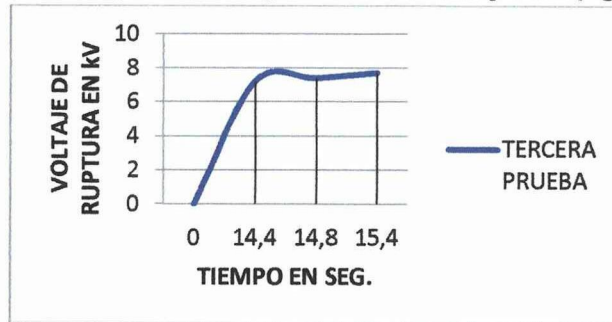
Elaborado por los investigadores

Tabla N° 18. Datos de la tercera prueba. (3 galgas)

N° DE DISPAROS	VALORES EN KV	DISTANCIA EN mm	TIEMPO ENTRE DISPAROS
Primer disparo	7,2	1.5 mm	3 minutos
Segundo disparo	7,4	1.5 mm	3 minutos
Tercer disparo	7,7	1.5 mm	3 minutos

Elaborado por los investigadores

Curva N° 3. Representación gráfica de la tercera prueba (3 galgas).



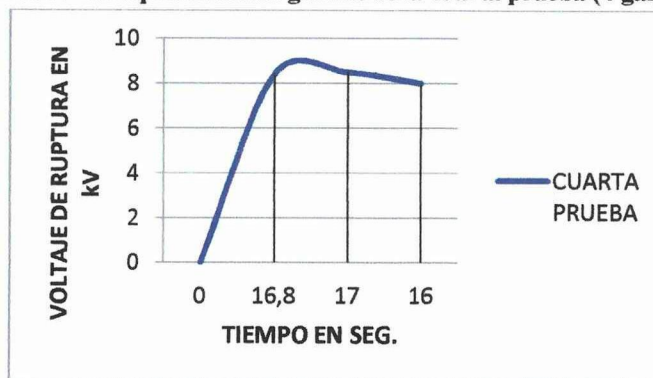
Elaborado por los investigadores.

Tabla N° 19. Datos de la cuarta prueba. (4 galgas)

N° DE DISPAROS	VALORES EN KV	DISTANCIA EN mm	TIEMPO ENTRE DISPAROS
Primer disparo	8,4	2 mm	3 minutos
Segundo disparo	8,5	2 mm	3 minutos
Tercer disparo	8	2 mm	3 minutos

Elaborado por los investigadores

Curva N° 4. Representación gráfica de la cuarta prueba (4 galgas).



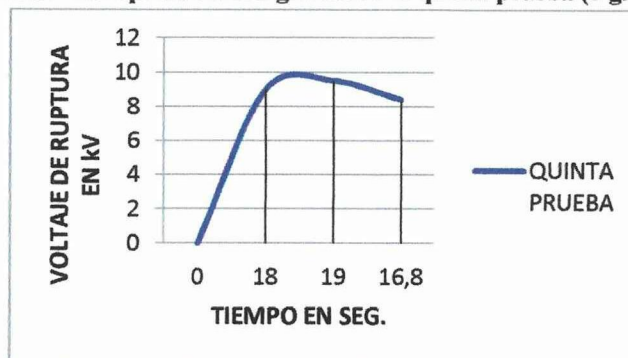
Elaborado por los investigadores

Tabla N° 20. Datos de la quinta prueba. (5 galgas)

N° DE DISPAROS	VALORES EN KV	DISTANCIA EN mm	TIEMPO ENTRE DISPAROS
Primer disparo	9	2.5 mm	3 minutos
Segundo disparo	9,5	2.5 mm	3 minutos
Tercer disparo	8,4	2.5 mm	3 minutos

Elaborado por los investigadores

Curva N° 5. Representación gráfica de la quinta prueba (5 galgas).



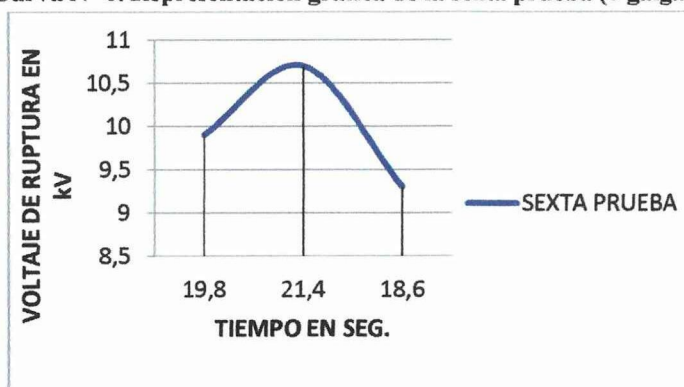
Elaborado por los investigadores

Tabla N° 21. Datos de la sexta prueba. (6 galgas)

N° DE DISPAROS	VALORES EN KV	DISTANCIA EN mm	TIEMPO ENTRE DISPAROS
Primer disparo	9,9	3 mm	3 minutos
Segundo disparo	10,7	3 mm	3 minutos
Tercer disparo	9,3	3 mm	3 minutos

Elaborado por los investigadores

Curva N° 6. Representación gráfica de la sexta prueba (6 galgas).



Elaborado por los investigadores

A continuación se presenta un resumen de todas las pruebas realizadas con el equipo detallando la rigidez dieléctrica y la distancia entre electrodos.

Tabla N° 22. Resumen de datos de las pruebas realizadas

N° DE PRUEBAS	RIGIDEZ DIELECTRICA EN kV	DISTANCIA DE ELECTRODOS EN mm
1	4,36	0,5 mm
2	5,76	1 mm
3	7,43	1,5 mm
4	8,3	2 mm
5	8,96	2,5 mm
6	9,96	3 mm

Elaborado por los investigadores

Análisis de resultados de las pruebas realizadas con el equipo OTS 60 SX.

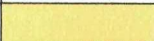




- La rigidez dieléctrica del aceite aumenta a medida que sube la distancia entre los electrodos, porque a mayor distancia mayor tiempo en la ruptura, haciendo que el aceite se vuelva más resistente (tabla N°18).

- La temperatura en el aceite al momento de la prueba es importante ya que varía mucho el resultado, porque a mayor temperatura las partículas de agua se evaporan, las impurezas se calcifican, etc., alterando el resultado de la prueba. Hay que tomar en cuenta también que por cada disparo que se realiza sube la temperatura en el aceite (tabla N°16).
- Según la norma utilizada ASTM D1816, la distancia entre electrodos es de 2 mm (tabla N° 19), valor promedio muy bajo con respecto lo que regula la norma, dejando fuera de rango dicho valor, y determinando que el aceite en prueba esta malo.
- La rigidez dieléctrica del aceite en kV, varia en gran parte por la temperatura, a la cual se encuentra el aceite sometido a prueba, porque a temperaturas altas el aceite aumenta su rigidez, por motivos anteriormente mencionados, contribuyendo con esto a una falsa lectura de la prueba.
- El recipiente de prueba no tiene que estar contaminado con fluidos acuosos puesto que la presencia de agua variara el PPM (partes por millón) del aceite sometido a la prueba.
- Existe una diferencia de valor en kV de ruptura entre la prueba 1y 2 con respecto a la prueba 4 y 5(tabla 22), tomando en cuenta que el aumento de distancia es la misma, la primera tiene una diferencia de más de 1 kV entre sí, mientras que la segunda tiene una diferencia de menos de 1 kV entre sí, esto se da por el aumento de temperatura en el aceite que produce la prueba.

3.8. SIMULADOR REALIZADO EN VISUAL BASIC.

Datos de simulación.

Tabla N° 23. Apariencia del aceite a utilizar.

condición del aceite	color del aceite	valor de rigidez dieléctrica permisible	temp. °C
Bueno		50 a 60 kV	10
marginal		40 a 50 kV	20
Malo		33 a 40 kV	30
muy malo		20 a 33 kV	40
desastroso		10 a 20 kV	60

Elaborado por los investigadores.(Norma D1816)

3.8.1. Líneas de programación.

A continuación se redacta toda la programación aplicada al simulador, que permitirá pronosticar un análisis del estado de un aceite aislante.

```
PublicClass Form1
```

```
PrivateSub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Button1.Click
```

```
Dim temperatura AsDouble
```

```
Dim rigidez AsDouble
```

```
If TextBox1.Text = ""Then
```

```
MsgBox("Ingrese un valor de temperatura")
```

```
Else
```

```
If RadioButton1.Checked = TrueThen
```

```
Label6.Text = "Bueno"
```

```
Label7.Text = "0,00-0,10 (mg KOH/gr)"
```

```
Label8.Text = "50 a 60 kV"
```

```
temperatura = Val(TextBox1.Text)
```

```
PictureBox2.Image = My.Resources.graf1
```

```
If temperatura >= 10 And temperatura <= 60 Then
```

```
rigidez = (temperatura / 5) + 48
```

```
Label10.Text = Str(rigidez) + "KV"
```

```
Label11.Text = -0.6 * (Val(TextBox1.Text) - 40)
```

```
+ 867
```

```
Else
```

```
MsgBox("Ingrese valores de temperatura entre 10°C y 60°C")
```

```
EndIf
```

```
EndIf
```

```

If RadioButton2.Checked = TrueThen
    Label6.Text = "Marginal"
    Label7.Text = "0,11-0,15(mg KOH/gr)"
    Label8.Text = "40 a 50 kV"
    PictureBox2.Image = My.Resources.graf2
    temperatura = Val(TextBox1.Text)
If temperatura >= 10 And temperatura <= 60 Then
    rigidez = (temperatura / 5) + 38
    Label10.Text = Str(rigidez) + "KV"
Else
    MsgBox("Ingrese valores de temperatura entre
10°C y 60°C")
EndIf
EndIf

If RadioButton3.Checked = TrueThen
    Label6.Text = "Malo"
    Label7.Text = "0,16-0,40 (mg KOH/gr)"
    Label8.Text = "33 a 40 kV"
    PictureBox2.Image = My.Resources.graf3
    temperatura = Val(TextBox1.Text)
If temperatura >= 10 And temperatura <= 60 Then
    rigidez = ((7 * temperatura) / 50) + 158 / 5
    Label10.Text = Str(rigidez) + "KV"
Else
    MsgBox("Ingrese valores de temperatura entre
10°C y 60°C")
EndIf
EndIf

If RadioButton4.Checked = TrueThen
    Label6.Text = "Muy Malo"
    Label7.Text = "0,41-1,50 (mg KOH/gr)"
    Label8.Text = "20 a 33 kV"
    PictureBox2.Image = My.Resources.graf4
    temperatura = Val(TextBox1.Text)
If temperatura >= 10 And temperatura <= 60 Then
    rigidez = ((13 * temperatura) / 50) + 87 / 5
    Label10.Text = Str(rigidez) + "KV"
Else
    MsgBox("Ingrese valores de temperatura entre
10°C y 60°C")
EndIf
EndIf

```

```

If RadioButton5.Checked = TrueThen
    Label6.Text = "Fatal"
    Label7.Text = "1,51 o mas (mg KOH/gr)"
    Label8.Text = "10 a 20 kV"
    PictureBox2.Image = My.Resources.graf5
    temperatura = Val(TextBox1.Text)
If temperatura >= 10 And temperatura <= 60 Then
    rigidez = (temperatura / 5) + 8
        Label10.Text = Str(rigidez) + "KV"
Else
    MsgBox("Ingrese valores de temperatura entre
10°C y 60°C")
EndIf
EndIf

EndIf

EndSub

PrivateSub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button2.Click
    Label6.Text = ""
    Label7.Text = ""
    Label8.Text = ""
    Label10.Text = ""
    TextBox1.Text = ""
    Label11.Text = ""
EndSub

PrivateSub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles MyBase.Load

EndSub

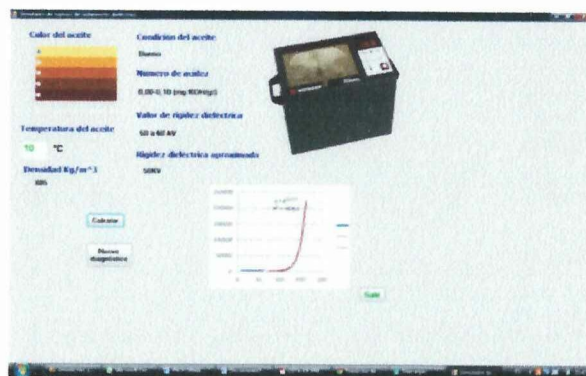
PrivateSub Button3_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs)
End
    MsgBox(MsgBoxStyle.OkOnly, MsgBoxStyle.Information,
"Realizado por Christian Cáceres y Vinicio Villamarín")
EndSub

PrivateSub Button3_Click_1(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button3.Click
End
EndSub
EndClass

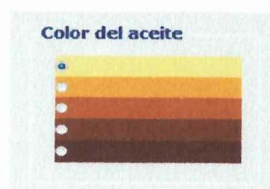
```

3.8.2. Procedimiento de la simulación.

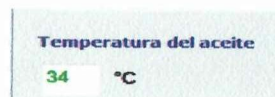
A continuación se presenta un procedimiento de cómo utilizar el programa, que permite simular el comportamiento de un aceite dieléctrico evaluando su resistencia y aislamiento. En los siguientes pasos se muestran las pantallas en las que se debe ingresar las variables para la simulación.



1.-Se tiene cinco colores diferentes a elegir, que representan el color del aceite a ser analizado por el programa.



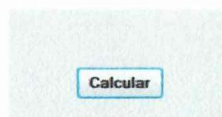
2.-Se debe ingresar el valor de temperatura del aceite medida al momento de la simulación.



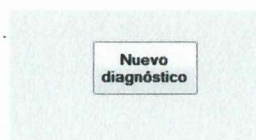
3.-Datos como la densidad y la acidez están grabados en la programación, lo cuales un aporte para la determinación del resultado final



4.-Una vez ingresados todos los datos que se requieren presionar el icono calcular para visualizar el resultado final.



5.-Para restablecer el programa y solicitar una nueva prueba se presiona el icono nuevo diagnóstico.



3.9. Conclusiones.

El presente proyecto de tesis a permitido a los postulantes llegar a una retroalimentación del porque la rigidez dieléctrica de los aceites de los transformadores debe ser analizada desde un punto de vista técnico, en el camino de realización de este proyecto, se ha encontrado varios causales para la degradación de la rigidez dieléctrica de los aceites de los transformadores y porque se debe hacer un análisis periódico de este tipo de elementos, como se describe en el marco teórico.

Se determinaron mediciones con el equipo de muestras OTS60XS, las cuales arrojan resultados de voltajes de ruptura del aislamiento del aceite a diferentes condiciones, para su interpretación mediante una simulación implementada y pronosticar dicho resultado.

- Se pudo concluir que la degradación de la propiedad dieléctrica del aceite sometido a prueba se debe principalmente a la humedad, en su defecto a la

contaminación del aceite con el agua, puesto que el agua es un conductor y un oxidante por excelencia degrada las propiedades físicas y químicas del aceite.

- Las pruebas realizadas con el equipo OTS 60SX demuestra que el aceite no necesariamente se degrada por el tiempo de uso, sino que depende de la carga de trabajo que haya tenido el transformador y de condiciones ambientales, dejando descartada la posibilidad de basarse en el tiempo de trabajo, para un diagnostico preliminar.
- El resultado de la prueba es una media promedio de tres disparos con un intervalo de 3 minutos entre sí, lo que permite establecer que en cada disparo la temperatura del aceite sube por la elevación de voltaje constante que produce el equipo para la ruptura del aislante, como muestra la curva de la prueba N° 1.
- Se dice que el aceite a mayor temperatura adopta una resistencia dieléctrica superior, pero esto se da por la presencia de partículas de agua, ya que a mayor contenido de agua, y a mayor temperatura, se tiene mayor evaporación, pero hasta un cierto límite de temperatura, luego se estabiliza y desciende, como se puede ver en la curva de la prueba N°6.
- El programa en comparación con el equipo de pruebas tiene una gran ventaja, porque permite obtener un análisis preliminar de la resistencia dieléctrica de un aceite sin necesidad de obtener muestras, y en el lugar que se haga la prueba, pero este resultado es bajo condiciones ideales.
- Al realizar las pruebas en el simulador se llega a la conclusión que utilizando parámetros ideales sin tomar en cuenta factores que afectan al aceite, como impurezas, partículas de agua y carbón al momento de la extracción de la muestra, varía significativamente el resultado de la prueba física con respecto a la de la simulación, es decir que el resultado se encuentra dentro de un margen de error aceptable.

- El simulador facilita la prueba de rigidez dieléctrica de un aceite, evitando la utilización de equipos de medición, consiguiendo un resultado inmediato y sin complicaciones, pero el resultado obtenido es totalmente en condiciones ideales, ambientales y del aceite.
- El simulador permite obtener un resultado de manera eficaz, ya que cuenta con opciones a elegir como son el color del aceite la densidad y la temperatura ambiente al momento de realizar las pruebas, obteniendo datos inmediatos sin la utilización de muestras de aceite.

3.10. Recomendaciones.

- Se recomienda como parte primordial del manejo del equipo de prueba de rigidez dieléctrica OTS 60SX, se tenga un conocimiento a fondo sobre las normas a utilizarse y el tipo de electrodo al cual corresponde cada norma.
- Al momento de realizar las pruebas hay que tener en cuenta que la temperatura y la humedad del ambiente influye en el análisis del aceite, ya que puede variar notablemente en los resultados, porque el aceite se adapta a la temperatura del ambiente.
- Se recomienda que el aceite aislante utilizado tiene que ser regenerado o en el caso de que ya no se pueda hacerlo deberá ser reciclado por motivos ecológicos, ya que afecta fuertemente al medio ambiente por las propiedades que posee.
- De la misma manera se recomienda a todo el personal que maneja este equipo realizar una instrucción al alumnado sobre rigidez dieléctrica y sus variantes y efectos físicos y químicos de los cuales depende una buena medición y adquisición de datos del equipo, ya que si no se tiene en cuenta estas recomendaciones los resultados obtenidos serán erróneos

- De la misma manera se recomienda a todo el personal que maneja este equipo realizar una instrucción al alumnado sobre rigidez dieléctrica y sus variantes y efectos físicos y químicos de los cuales depende una buena medición y adquisición de datos del equipo, ya que si no se tiene en cuenta estas recomendaciones los resultados obtenidos serán erróneos
- Se recomienda tener un excelente almacenamiento de las muestras que se van a someter a pruebas en el equipo puesto que su contaminación con agua u otros productos variara sustancialmente los resultados, y si las muestras vienen de lugares lejanos se debe tener presente la humedad a la cual se sometió el envase y dejarlo reposar.
- El programa Visual Basic que es utilizado en la simulación es de fácil instalación y acceso, pero al momento de la programación hay que tener muy en cuenta los iconos y opciones a utilizar, porque un solo error en una línea de programación puede alterar el resultado de la prueba.
- Al trabajar con el simulador se recomienda ingresar valores de temperatura en un rango de 10°C a 60°C, ya que el programa no admite valores superiores o inferiores a los establecidos.
- Se recomienda a la universidad adquirir (comprar) las normas ASTM D1816 y todas las normas que regula las pruebas ya sean para aislamientos sólidos, líquidos, gaseosos y así aprovechar al máximo el laboratorio implementado generando utilidad de los equipos y de la tecnología que cuenta la universidad.

BIBLIOGRAFÍA

- ROBALINO SOTO Iván Mauricio. Vida útil del transformador. Año 1998.
- MEDINA VALAREZO Santiago Enrique. Pruebas en aceites aislantes. Año 2006

- FLORIAN CARBONELL Walter Miguel. El análisis de gases disueltos en aceite mineral dieléctrico como alternativa para el desarrollo de programas de mantenimiento preventivo y predictivo de transformadores trifásicos de potencia. Año 1997
- LORA RUBIÑOS Augusto Jesús. Diseño de un generador de impulso de alta tensión basado en las normas ASTM-D 3426 e IEC-60243-3 para ensayos de rigidez dieléctrica de materiales polímeros y sólidos. Año 2008.
- CORRALES LEÓN Julio Cesar. Pruebas para instalación puesta en servicio operación y mantenimiento de transformadores de potencia. Año 1999.
- ALDAS SALTOS Alejandro. Proyecto de norma para pruebas de transformadores.
- CAMARENA M Pedro. Construcción de reguladores de voltaje y pequeños transformadores monofásicos. Noviembre 1981. (tercera edición).
- CAMERA Pedro. Transformadores eléctricos industriales. Reparación diseño y construcción. Noviembre 1974. (segunda edición).
- RAS Enrique. Transformadores de potencia de medida y de protección. Séptima edición 1991.
- ZOPPETTI JUDEZ Gaudencio. Estaciones transformadoras y de distribución. Cuarta edición.
- AVELINO PEREZ Pedro. Transformadores de distribución. Teoría, cálculo, construcción y pruebas. Año 2008.
- GABRIUNAS V. Apuntes de Electrónica. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. 1999
- RONCANCIO H., VELASCO. H. Una Introducción a Labview. Semana de Ingenio y Diseño. Universidad Distrital "Francisco José de Caldas". 2000.

ANEXOS.

3.11. Normas de seguridad.

Para realizar pruebas con el equipo OTS 60SX se debe tener en cuenta lo siguiente.

- Usar guantes de seguridad.
- Usar gafas de seguridad.
- Evitar el contacto directo con la piel.
- Pulseras antiestáticas.
- Usar calzado antideslizante.
- Mandil.

3.12. Manual de operación del equipo y reglas a seguir.

Descripción general.

El OTS 60 SX es un instrumento para la prueba de resistencia dieléctrica, semiautomático y de peso liviano. El instrumento es apropiado para uso en campo protegido y puede ser impulsado a través de una gama de suministros de la red. La salida máxima de 60 kV permite realizar pruebas en aceite procedente de una amplia variedad de instalaciones eléctricas, incluidos transformadores, disyuntores, y equipos parecidos.

El funcionamiento del aparato es sumamente sencillo y los resultados son presentados en un brillante display por LED. Un temporizador de un minuto automático funciona cuando se interrumpe el voltaje alto para la prueba de resistencia.

El instrumento está construido dentro de una recia caja de chapa de acero. El aparato incorpora asas para facilitar su transporte. Se incluye una bolsa en el lado lateral del instrumento para alojar accesorios tales como el cable eléctrico, electrodos adicionales y el calibre espaciador.

Una caja de transporte opcional incluye un tirante para colgar sobre el hombro. Se incluyen tres tipos de electrodos: esférico (tipo IEC), en forma de seta (VDE/ASTM D1816) y cilíndrico (ASTM D877). La muestra de aceite puede agitarse con una hélice impulsada por un motor disponible en recipientes seleccionados. El recipiente se coloca en la parte superior del instrumento y se cubre mediante una puerta de policarbonato transparente con pantalla de malla, de modo que puede observarse la descomposición del aceite. Un dispositivo de enclavamiento asegura que el alto voltaje sea desconectado cuando se abre la puerta de la cámara.






Preparación del aparato para prueba del aceite



Asegúrese que el instrumento esté conectado correctamente a prueba. El aparato debe conectarse a una toma con un conductor de protección a tierra.





Antes de conectar el suministro de red asegúrese que el selector de voltaje ubicado en el panel de entrada de la red este situado en voltaje requerido también deberá colocarse el fusible correspondiente para el voltaje del suministro (véase las especificaciones) los porta fusibles están situados a la entrada de suministro

Panel de control del equipo.

El panel de control contiene el interruptor de conexión y desconexión de suministro, display de alto voltaje, selector de promedio de rampa de voltaje y las tres teclas de control.

-  Botón de encendido del equipo.
-  Botón de selección de la norma.
-  Led indicador de las normas.
-  Botón de selección de inicio.
-  Botón de stop.

-  Botón de pause.
-  Icono que indica cuando la ruptura de resistencia culminó.

La norma apropiada para la prueba a realizar deberá seleccionarse usando la tecla  **start**. La tecla  iniciará el alto voltaje. El indicador  de alto voltaje rojo se encenderá para indicar que está activo el voltaje de salida. El voltaje incrementará de acuerdo al aceite en prueba y el valor correspondiente será mostrado en el display. Si se produce descomposición del aceite el instrumento detectará esto e inmediatamente cortará el alto voltaje. El valor del voltaje de descomposición permanecerá en el display hasta que se pone en marcha la prueba siguiente. Si no se produce descomposición alguna, el alto voltaje ascenderá a 60 kV. En este momento se corta el voltaje de prueba y su valor máximo permanecerá en el display. La prueba se podrá detener en cualquier momento pulsando el botón STOP . Con esto se retirará el alto voltaje de la muestra de aceite y el display mostrará 0,0 kV.

Cable de alimentación.

Si el cable de alimentación no es compatible con la toma eléctrica, no use ningún adaptador. Emplee un cable de alimentación adecuado, o si es necesario cambie el enchufe cortando el cable y utilizando uno idóneo, el código de los cables es el siguiente:

Tierra	Amarillo/Verde
Neutro	Azul
Fase	Marrón

Muestreo del aceite.

Las especificaciones de prueba pertinentes aportaran consejos sobre los mejores métodos que deben utilizarse para el muestreo del aceite. La contaminación del aceite puede llevar a resultados engañosos. Deje escapar una pequeña cantidad de aceite antes de muestrear y asegúrese que el aceite fluye de una forma uniforme

Preparación del recipiente para prueba de aceite

Una vez seleccionado el recipiente correcto para la prueba requerida deberá establecerse el entrehierro del electrodo, esto se logra ajustando la tuerca roscada situada al costado del recipiente.

Se incluye un juego de galgas palpatorias individuales de 0,5mm para la medición precisa del entrehierro. Las galgas pueden combinarse para medir de 1 a 2,5 mm

Dejando espacio para colocar la tapa, llene el recipiente con la muestra de aceite, la cantidad de aceite dependerá de la tapa a utilizarse .Ponga el recipiente en la cámara de prueba conectando el cable eléctrico del motor, si se incluye, y cierre con cuidado la puerta de modo que funcione el interruptor de enclavamiento de seguridad

Desarmado del recipiente.

- Afloje ambos tornillos de bloqueo blancos.
- Sujete cada electrodo por turno, y desenrosque y retire el brazo deslizante de cada electrodo.
- Retire ambos electrodos del recipiente.
- Lave las manos y luego limpie y seque el recipiente.

Rearmado del recipiente.

- Con las manos limpias y desprovistas de contaminación, coloque los electrodos limpios en el recipiente.
- Coloque cada electrodo por turno con los dedos, y rosque un brazo deslizante a través del recipiente en cada electrodo por turno.
- Centre los electrodos y ajuste la separación, usando una galga apropiada.
- Asegurando que los aros tóricos de vitón no estén sucios, apriete ambos tornillos de bloqueo.

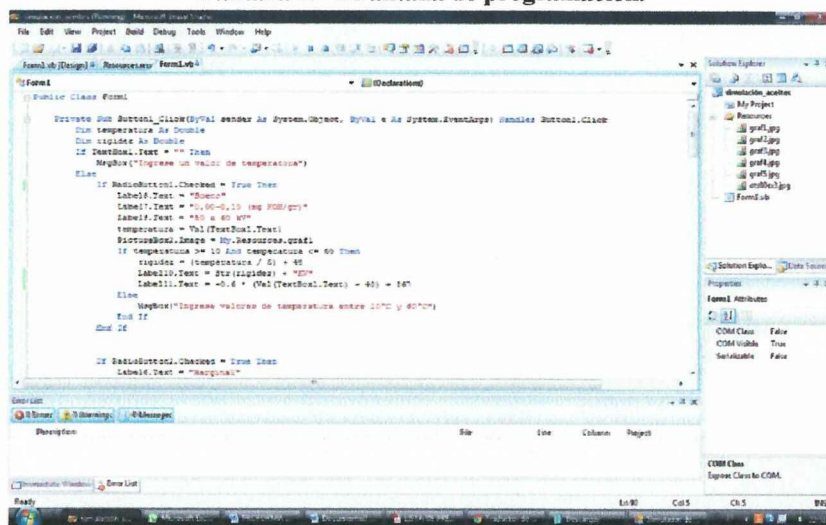
Precauciones necesarias durante el muestreo.

Como el aceite tomado de un grifo de vaciado inevitable contiene un exceso de muestras solidas depositadas y no puede ser representativo de la totalidad del aceite, este deberá dejarse fluir hasta que fluya transparente probar. Esta cantidad depende del tamaño del transformador o recipiente principal. Normalmente se vacían unos 2 litros. Cuando se muestrea el aceite contenido en un bidón o recipiente de suministro, el aceite deberá fluir a un promedio uniforme dentro del recipiente de prueba y una vez circulado alrededor de los lados deberá ser desechado. Sin alterar el promedio de flujo del aceite, la cantidad requerida para la prueba deberá recogerse ahora teniendo cuidado extremado de prevenir el ingreso de polvo atmosférico, fibras de trapo o humedad.

Proteger la muestra contra luz directa hasta que vayan a probarse. Cuando se vierte el aceite deberá impedirse la formación de burbujas de aire y turbulencia. Es preciso tener cuidado especial para evitar contaminación si la prueba ha de hacerse en un camión cisterna de suministro a granel y en todos los casos donde se espera alto nivel de resistencia dieléctrica. El procedimiento sugerido arriba deberá ser observado estrictamente.

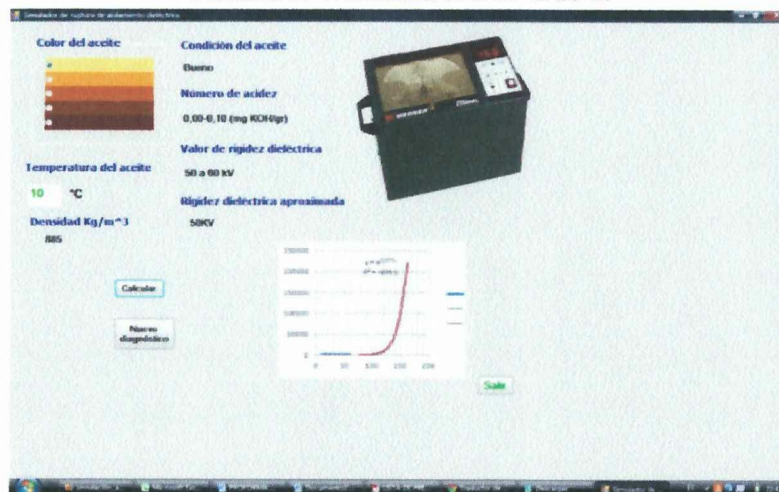
Pantallas del programa de simulación.

Pantalla N° 1 Pantalla de programación.



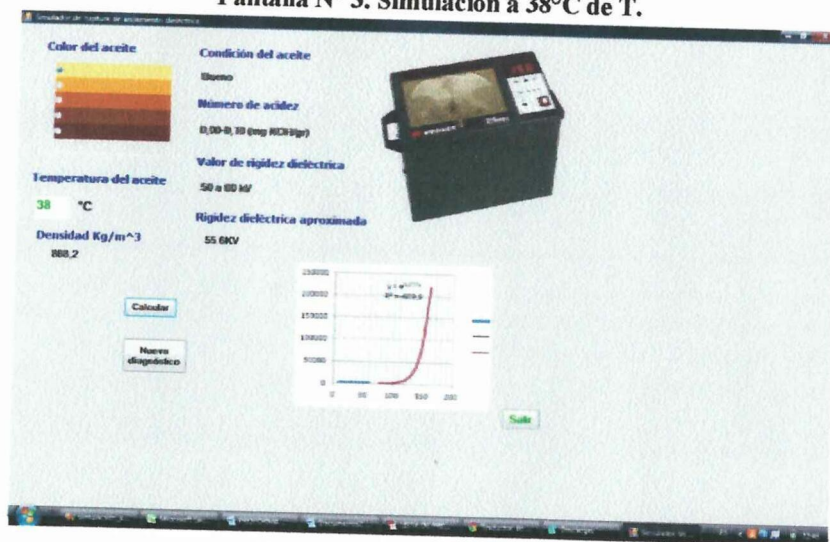
Elaborado por los investigadores

Pantalla N° 2 Simulación a 10°C de T.



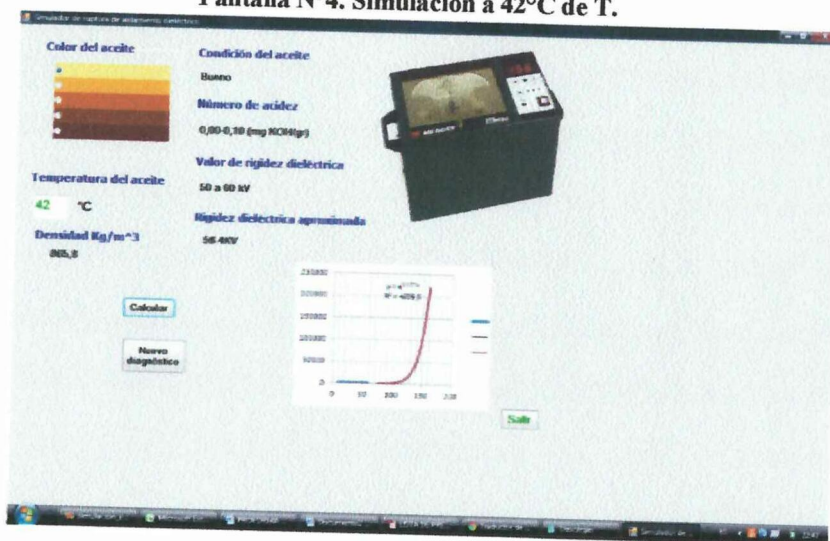
Elaborado por los investigadores

Pantalla N° 3. Simulación a 38°C de T.



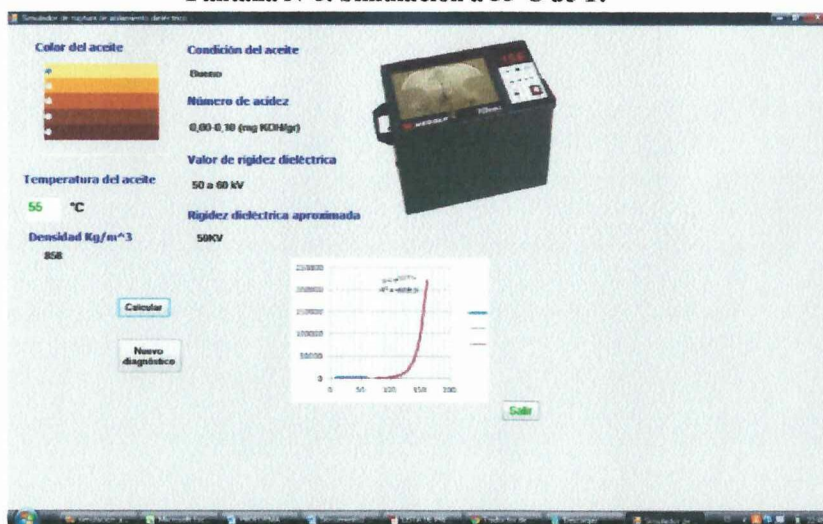
Elaborado por los investigadores

Pantalla N°4. Simulación a 42°C de T.



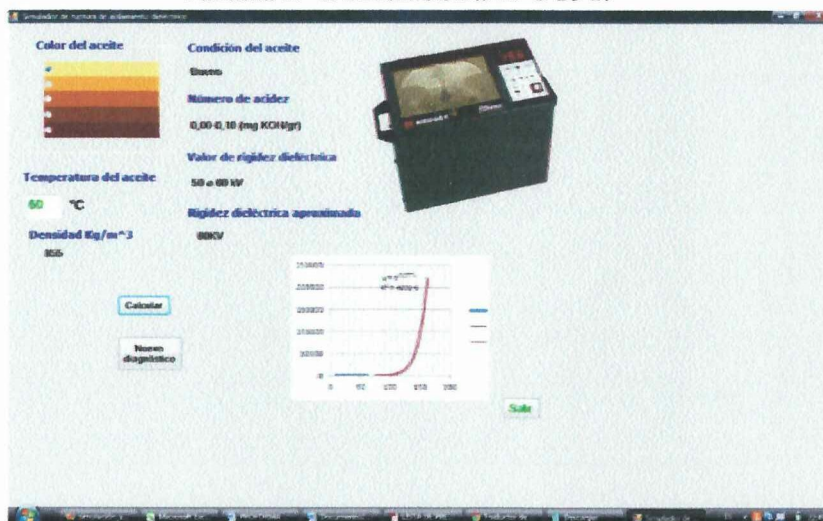
Elaborado por los investigadores

Pantalla N°5. Simulación a 55°C de T.



Elaborado por los investigadores

Pantalla N° 6. Simulación a 60°C de T.



Elaborado por los investigadores

Fotos al momento de hacer la prueba en el equipo OTS 60SX.

Foto 1. Equipo OTS 60XS



Elaborado por los investigadores.

Foto 2. Calibración de los electrodos



Elaborado por los investigadores.

Foto 3. Colocación de la probeta en el equipo.



Elaborado por los investigadores.

Foto 4. Primer disparo de prueba



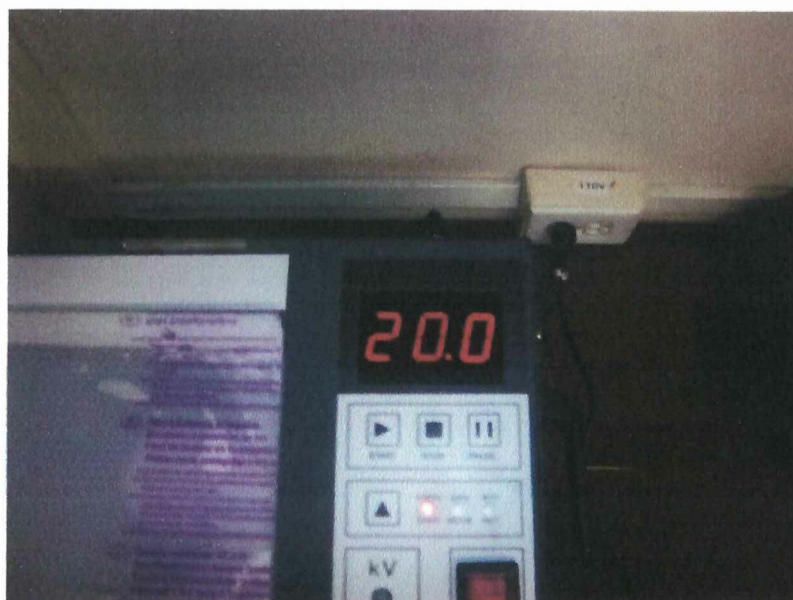
Elaborado por los investigadores.

Foto 5. Segundo disparo de la prueba.



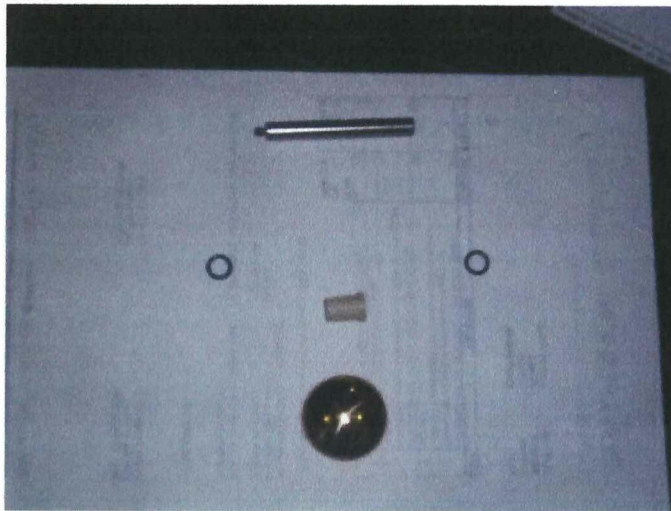
Elaborado por los investigadores.

Foto 6. Tercer disparo de la prueba.



Elaborado por los investigadores.

Foto 7. Partes internas de la probeta.



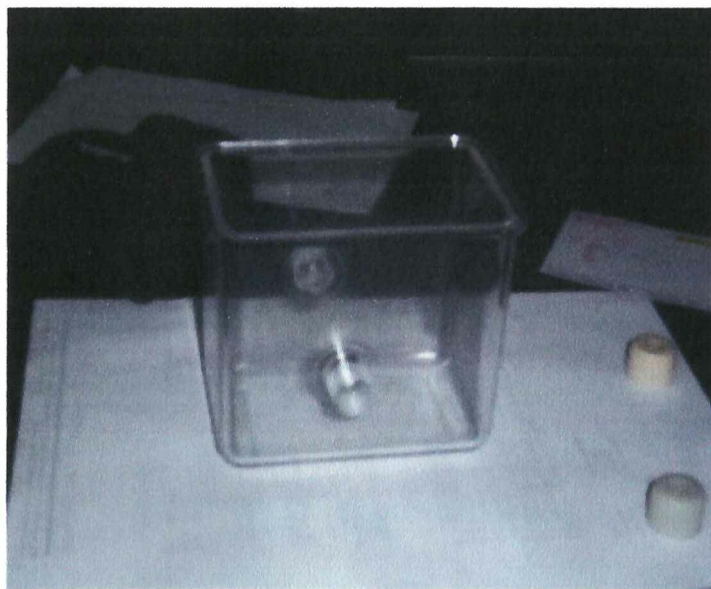
Elaborado por los investigadores.

Foto 8. Electrodo.



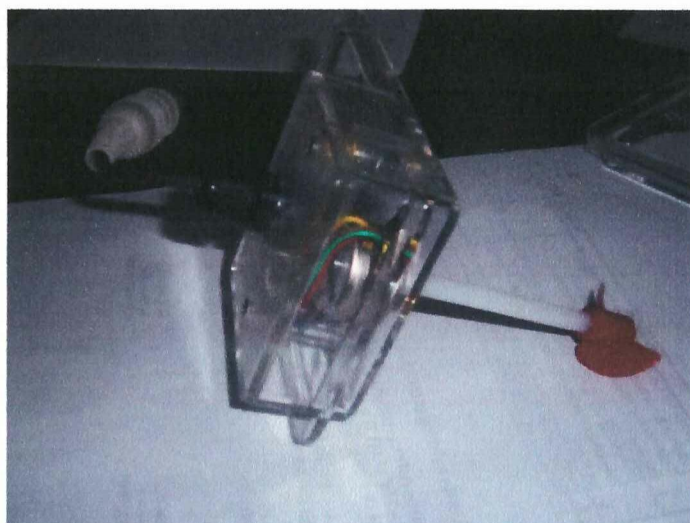
Elaborado por los investigadores.

Foto 9. Probeta.



Elaborado por los investigadores.

Foto 10. Tapa de la probeta.



Elaborado por los investigadores.

Foto 11. Galgas para calibrar los electrodos.



Elaborado por los investigadores.