



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

BEETHOVEN NÓBREGA DE ASSIS

**ESTUDO SOBRE RIGIDEZ DIELÉTRICA DE ÓLEO ISOLANTE
EM TRANSFORMADORES**

Campina Grande, Paraíba
Abril de 2015

BEETHOVEN NÓBREGA DE ASSIS

ESTUDO SOBRE RIGIDEZ DIELÉTRICA DE ÓLEO ISOLANTE
EM TRANSFORMADORES

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Equipamentos Elétricos

Orientador:

Professor Karcus Marcelus Colaço Dantas, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Abril de 2015

Dedico este trabalho aos meus pais, Antônio e Sônia que nunca mediram esforços para me proporcionar uma boa educação e sempre me apoiaram na realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos e por esta sempre presente em minha vida.

Aos meus pais Antônio e Sônia, e aos meus irmãos, Priscila e Brendo por serem a base da minha vida.

Aos meus familiares, pelo apoio e torcida.

Aos meus amigos, que fizeram parte de minha vida acadêmica e aos mais antigos, pelo companheirismo e apoio.

Ao meu orientador, Karcus, pelo tempo dedicado, apoio e ensinamentos.

A todos os professores e colegas de curso, pelos incentivos de coragem e persistência para realização dos meus objetivos nessa caminhada, o meu sincero agradecimento.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin.

RESUMO

Neste trabalho foi realizada uma revisão das normas técnicas vigentes e da literatura que envolve o estudo da rigidez dielétrica de óleo mineral isolante. Também foi estudado o aparelho *Insulating oil tester*, que tem a finalidade de analisar a qualidade e o estado do óleo mineral isolante através da medição de sua rigidez dielétrica. Dessa forma, foi elaborado um material didático para utilização do equipamento, através do qual, ensaios com diferentes amostras foram realizados com o intuito de comparar e verificar o estado de cada amostra.

Palavras-chave: Óleo mineral isolante, Rigidez dielétrica, Normas técnicas, *Insulating oil tester*.

ABSTRACT

In this work, a review study of the current technical standard and the consultation of the literature that involves the study of the dielectric strength of insulating oil was performed. Also the device was studied *Insulating Oil Tester*, which aims to analyze the quality and condition of the insulating oil by measuring its dielectric strength. Therefore, a didactic material have been created to use the equipment, through which, experiments with different samples were performed in order to compare and verify the status of each sample.

Keywords: Insulating oil, Dielectric strength, Technical standards, Insulating oil tester.

SUMÁRIO

Lista de Ilustrações	9
Lista de Tabelas	10
1 Introdução.....	11
1.1 Objetivos.....	12
1.2 Estrutura do trabalho.....	12
2 Fundamentação teórica.....	13
2.1 Normas.....	13
2.1.1 NBR 6869.....	13
2.1.2 IEC 156.....	15
2.2 Óleo mineral isolante em transformadores	16
2.2.1 Óleo mineral isolante.....	18
2.2.2 Teoria da quebra do isolamento líquido	19
2.2.2.1 Repartição eletrônica.....	19
2.2.2.2 Mecanismo de partículas sólidas em suspensão	20
2.2.2.3 Ruptura por Cavitação.....	21
2.2.2.4 Mecanismo de degradação térmica	21
2.2.2.5 Volume de óleo estressado	21
2.2.3 Acompanhamento do óleo isolante em serviço	22
2.2.4 Tratamento do óleo isolante.....	25
2.3 Insulating oil tester.....	26
3 Material e método.....	29
3.1 Material.....	29
3.1 Metodologia do ensaio	30
3.1.1 Ensaio com o medidor de rigidez dielétrica.....	31
3.1.2 Filtração do óleo	32
4 Resultados	34
4.1 Características do ensaio.....	34
4.2 Resultados dos ensaios.....	35
5 Conclusão	39
Bibliografia.....	41
Apêndice A.....	42

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Imagem detalhada do Medidor de rigidez dielétrica	26
Figura 2 - Menu principal.....	28
Figura 3 - Menu de seleção de teste.	29
Figura 4 - Conjuntura bomba de vácuo, funil, papéis filtro e béquer.	32
Figura 5 - Papéis filtro utilizados.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dielétricas de alguns líquidos.	19
Tabela 2 - Testes realizados no óleo isolante.	23
Tabela 3 - Principais funções.	27
Tabela 4 – Valores teóricos de rigidez dielétrica e estado do óleo isolante.....	30
Tabela 5 - Resultados dos ensaios.	35
Tabela 6 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação.	36
Tabela 7 – Resultados dos ensaios no tratamento do óleo.....	37

1 INTRODUÇÃO

O óleo mineral isolante é comumente usado para preenchimento de transformadores, disjuntores, cabos de alta tensão e capacitores. Nos transformadores de dielétrico líquido, é utilizado tanto para fornecer isolamento entre as partes ativas e as partes ligadas a terra como para realizar a troca de calor com o meio atmosférico proporcionando assim um efeito de resfriamento. O óleo em serviço está sujeito a altas temperaturas, reações de oxidação, presença de humidade e impurezas, que afetam a sua rigidez dielétrica. O acompanhamento das propriedades elétricas do dielétrico líquido é de extrema importância para manter em boas condições o uso do transformador. A avaliação frequente das propriedades elétricas do óleo em operação é feita através das orientações contidas na normatização técnica vigente.

O óleo mineral consiste em uma mistura de hidrocarbonetos, composta por parafinas, iso-parafinas, naftalenos e aromáticos, que é um produto secundário da destilação do petróleo no processo de produção da gasolina. É um produto de baixo custo, produzido em grandes quantidades, o óleo é quase transparente, incolor e quimicamente inerte. Algumas considerações são colocadas em questão na escolha de um dielétrico líquido, a principal delas é sua estabilidade química. Outras considerações são o custo, economia de espaço e a suscetibilidade a influências ambientais.

Outro fator importante são as propriedades elétricas e físicas do óleo mineral que incluem rigidez dielétrica, fator de potência, condutividade elétrica, ponto de fulgor, teor de gás, viscosidade, constante dielétrica, fator de dissipação, estabilidade, etc.

O acompanhamento e a manutenção da qualidade das propriedades do óleo isolante são etapas de vital importância para a conservação das boas condições de serviço dos transformadores de potência. Esse acompanhamento segue as diretrizes estabelecidas pelas normas NBR 6869 e a IEC 156. O Engenheiro Eletricista deve seguir o que está instituído em norma para obter resultados concisos na realização dos testes de rotina. Neste trabalho, enfatiza-se a importância de avaliar a qualidade do dielétrico líquido isolante dos transformadores, através de interpretações dos valores de rigidez dielétrica. Com base nos limites admissíveis especificados nas normas vigentes, os valores de rigidez podem ser medidos através de ensaios de rotina utilizando o equipamento *Insulating Oil Tester*.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é realizar um estudo sobre a rigidez dielétrica de óleos isolantes, utilizados em transformadores de potência. Os objetivos específicos são:

- Estudar e utilizar o equipamento *Insulating Oil tester*, seguindo os direcionamentos normatizados pela NBR 6869 e a IEC 156, para realizar ensaios com diferentes amostras de óleo isolante.
- Verificar os resultados obtidos nos ensaios e estado de casa amostra.
- Confeccionar um material didático sobre a utilização desse equipamento, o qual será direcionado para disciplinas do curso de graduação em Engenharia Elétrica da UFCG.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo, uma introdução sobre o tema é feita. No segundo capítulo, uma revisão bibliográfica é feita para compreensão do assunto em questão. São abordados conceitos sobre o óleo mineral isolante usado em transformadores, os aspectos gerais das normas que regem os ensaios para determinação da rigidez dielétrica do dielétrico líquido e a utilização do equipamento *Insulating Oil Tester*.

No terceiro capítulo, a metodologia que foi utilizada nos ensaios e os materiais utilizados são apresentados. No quarto capítulo, os resultados dos ensaios são mostrados assim como a indicação do Apêndice A, que contempla um material didático elaborado segundo os objetivos do trabalho.

No quinto e último capítulo, são apresentadas as conclusões que puderam ser obtidas, com base no estudo realizado, mostrando os aspectos positivos e negativos dos ensaios e a contribuição que o trabalho dá no campo da engenharia elétrica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo deste capítulo é explicar os aspectos teóricos que envolvem o óleo mineral isolante utilizado em transformadores, apresentando as normas para o ensaio de rigidez dielétrica, além da apresentação do equipamento *Insulating Oil Tester*.

2.1 NORMAS

Algumas das normas que abrangem o tema sobre a determinação da rigidez dielétrica de líquidos isolantes elétricos são: a NBR 6869 e a IEC 156. As duas apresentam o mesmo princípio, que é a determinação da rigidez dielétrica de líquidos isolantes. As duas se diferem na aplicação do método quanto à taxa de variação de tensão aplicada no óleo, o intervalo de tempo para se iniciar um teste e outro e o formato dos eletrodos. A apresentação dessas normas foi feita com o intuito de tornar o trabalho mais sólido, apresentando a norma brasileira e a internacional.

Além destas, existem outras resoluções e normas específicas para determinação de amostragens e outras propriedades, que prescrevem os métodos para determinação das mesmas. Estas normas não serão contempladas neste trabalho, porém serão citadas à medida que for necessário como informação para um melhor entendimento.

2.1.1 NBR 6869

A NBR 6869 apresenta restrições e recomendações para ensaios com líquidos isolantes elétricos. As diretrizes desses ensaios avaliam a ruptura da tensão de isolamento do dielétrico, fator indicativo para revelar a presença de contaminantes, possibilitando o encaminhamento do óleo para tratamento. Esta norma prescreve o método para determinação da rigidez dielétrica de líquidos isolantes (ABNT NBR 6869, 1989). Nesse sentido, procura-se inicialmente informar uma série de requisitos referentes ao óleo e à aparelhagem utilizada, a fim de garantir uma qualidade na obtenção dos resultados e execução dos ensaios.

O ensaio em princípio é o mesmo para todas as classes de óleo, novos, usados ou em serviço. Sua aplicação se torna restrita para óleos com viscosidade maior que 900

mm²/s a 40 °C e também para controle e tratamento de óleo com classe de tensão acima de 230 kV. Na execução do ensaio, as condições a serem adotadas para a amostragem do óleo devem ser realizadas de acordo com a NBR 8840. Não sendo objetivo deste trabalho abordar os detalhes dessa norma, os demais procedimentos devem seguir as diretrizes da NBR 6869. A norma especifica as condições de utilização da aparelhagem no ensaio. A célula de ensaio confeccionada de vidro ou plástico transparente, deve ser fechada com um volume efetivo entre 300 ml e 900 ml. Os eletrodos utilizados devem ser de cobre, bronze, latão ou aço inoxidável na forma de disco. Os eletrodos devem ser montados coaxialmente, na posição horizontal e distanciados entre si de 2,5 mm. A exatidão para ajuste entre os eletrodos deve ter uma precisão de 0,1 mm, esse ajuste deve ser feito com calibradores.

Para atender as características do equipamento elétrico do ensaio, alguns requisitos são especificados como transformador, sistema de proteção, regulador de tensão e medição da tensão de ensaio. A tensão do ensaio é obtida com um transformador do tipo elevador, alimentado por uma fonte de baixa tensão. A tensão primária deve ser aumentada gradualmente de forma manual ou de dispositivo de controle automático. O sistema de proteção assegura que o ensaio, ao ser executado evite ao máximo, oscilações de alta frequência. Para proteger o equipamento e evitar decomposição do óleo no momento da ruptura, uma resistência limitadora de corrente pode ser conectada em série com a célula de ensaio. Havendo ainda uma proteção com um disjuntor atuado pela corrente de fluxo originado pela ruptura da amostra no circuito primário do transformador de alta tensão. A regulação de tensão pode ser efetuada diversos métodos. A norma sugere autotransformador de faixa variável, divisor de tensão tipo resistência, gerador de regulação de campo e regulador de indução. Sendo preferível um sistema automático para aumento da tensão, devido a dificuldade em se obter valores uniformes de elevação da tensão no processo manual. A medição da tensão para os efeitos da norma, a magnitude da tensão de ensaio é o valor eficaz.

O ensaio se resume, a submeter uma amostra do líquido a uma tensão elétrica sob as condições prescritas pela norma, obtendo-se a rigidez dielétrica como sendo a tensão quando ocorrer uma descarga de corrente entre os dois eletrodos através da amostra de óleo. A célula não tendo sido utilizada por algum tempo, ela deve ser totalmente limpa, os eletrodos removidos e finalmente enxaguada com óleo novo e limpo. Na preparação da amostra o conteúdo do recipiente deve ser cuidadosamente agitado e invertido várias vezes, possibilitando uma distribuição homogênea das

impurezas contidas no líquido evitando a formação de bolhas de ar. A temperatura do líquido, durante o ensaio, deve ser a mesma do ambiente aproximadamente 20 °C. No procedimento do ensaio se aplica aos eletrodos uma tensão crescente regular igual a 3 kV/s, partido do zero. No caso a ocorrência de um arco franco, o disjuntor deve abrir o circuito. A tensão de ruptura é a tensão atingida durante o ensaio no momento em que ocorre o arco franco.

A norma sugere dois tipos de ensaios, de arbitramento e de rotina. No primeiro são feitos cinco enchimentos sucessivos da célula, obtendo cinco medidas onde a rigidez dielétrica é a média dos cinco valores. No ensaio de rotina, são feitos cinco ensaios consecutivos em um único enchimento da célula, com um minuto de intervalo entre cada medição. A média aritmética das cinco medições é o valor da rigidez dielétrica.

2.1.2 IEC 156

A IEC 156 é uma norma internacional que se aplica a líquidos isolantes, para determinação da tensão de ruptura do dielétrico líquido. Esta norma especifica o método para determinar a tensão de ruptura de dielétricos líquidos isolantes à frequência industrial (CEI IEC 156, 1995). O ensaio, conta com um aparelho específico, que é submetido a um campo elétrico de corrente alternada que aumenta à medida que se aumenta a tensão até que ocorra a ruptura do dielétrico. O método se aplica a todos os tipos de líquidos de viscosidade nominal de até 350 mm²/s a 40 °C, além de ser adequado tanto para testes de aceitação de líquidos isolantes novos, como para líquidos tratados antes ou durante o enchimento de equipamentos, ou para acompanhamento e manutenção de aparelhos cheios de óleo em serviço.

Em um estudo específico, a amostragem do óleo isolante deve ser realizada com total conformidade com os procedimentos descritos na IEC 475 (CEI IEC 475, 1974), os demais procedimentos, considerações e requisitos devem ser seguidos conforme está descrito na IEC 156.

A norma exige que o equipamento elétrico consista de um transformador elevador, regulador de tensão, dispositivos limitadores de energia e sistema de comutação. Sendo sempre aconselhável a utilização de sistemas automatizados ao invés do processo manual, devido a dificuldade de obter valores uniformes de elevação da tensão. A magnitude da tensão do teste é definida pelo valor de pico dividido por $\sqrt{2}$, que

corresponde ao valor eficaz. Os eletrodos devem ser de latão, bronze ou aço inoxidável no formato esférico. São montados coaxialmente, na posição horizontal distanciados entre si de $2,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$. O ensaio pode ser realizado com ou sem agitação. As diferenças entre os testes, com ou sem agitação não foram consideradas estatisticamente significativas, no entanto, pode ser conveniente quando aparelhos são capazes de realizar de maneira automática a agitação. Os eletrodos que não foram devidamente armazenadas por um longo tempo, devem ser limpos para que possa preparada a célula. A limpeza de toda a superfície deve ser feita com um solvente volátil adequado de excelente evaporação. A norma recomenda que o volume da amostra seja aproximadamente três vezes a capacidade da célula de teste. Os recipientes das amostras segundo a IEC 475 é o vidro âmbar, garrafas de vidro limpas podem ser utilizadas mas devem ser protegidas da luz direta. Os recipientes de plásticos que são resistentes ao óleo testado podem ser utilizados uma única vez. No momento do teste, a temperatura do líquido e do ambiente não devem diferir em mais de $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

O procedimento do ensaio se inicia com a preparação da amostra. Imediatamente antes de encher a célula de teste, o recipiente é agitado suavemente algumas vezes proporcionando uma distribuição uniforme das impurezas sem causar a formação de bolhas de ar. Exposição desnecessária ao ar do ambiente deve ser evitada. O enchimento da célula deve ser feito lentamente, evitando a formação de bolhas de ar. A temperatura da amostra é medida nesse momento. A aplicação da tensão é iniciada após cinco minutos após o termino do enchimento da célula, assegurando a não formação de bolhar de ar visíveis entre os eletrodos. A tensão aplicada aumenta uniformemente de zero a uma taxa de 2 kV/s até ocorrer a ruptura. A tensão no momento da ruptura é o valor medido. São realizadas seis medições com o mesmo enchimento da célula, com um intervalo de dois minutos entre cada medição. Caso seja usado um agitador, deverá ser executado continuamente durante todo o ensaio. A média dos seis valores das medições corresponde ao valor da rigidez dielétrica.

2.2 ÓLEO MINERAL ISOLANTE EM TRANSFORMADORES

Os transformadores são equipamentos usados em sistemas elétricos. Nos transformadores, a circulação da corrente elétrica pelas espiras da bobina primária faz com que seja induzido um campo eletromagnético no seu núcleo de aço silício, que

induz uma tensão nos terminais da bobina secundária. Sendo assim é necessário que não ocorra a passagem dessa corrente entre as espiras de uma mesma bobina, ou das bobinas para o núcleo e partes aterradas. Essa passagem por este caminho indesejado é evitada com o isolamento elétrico entre as espiras por meio de papel ou outros isolantes sólidos.

O aquecimento devido à resistência elétrica dos condutores é causado pela passagem da corrente elétrica, o calor gerado causa degradação térmica do material isolante, assim o isolante elétrico líquido é usado para refrigeração das espiras do material condutor. Além disso, pode-se ressaltar que ao utilizar um óleo mineral isolante com ótimas características de isolamento, mais econômico será o projeto do transformador devido à redução do isolamento sólido e das distâncias entre as espiras, as bobinas e o núcleo e entre as partes aterradas.

Como já foi mencionado, o óleo mineral isolante é o dielétrico líquido mais habitualmente utilizado em transformadores. Em serviço, o óleo é submetido a um aquecimento prolongado a altas temperaturas em torno de 950 °C, e conseqüentemente, é exposto a um processo de envelhecimento progressivo (NAIDU, 1995). Com o tempo, o óleo vai escurecendo sua cor, pelo fato de ocorrer a formação de ácidos, resinas e borra no líquido. Alguns ácidos são corrosivos para os materiais isolantes sólidos e peças metálicas do transformador, por isso, é importante avaliar continuamente a qualidade do óleo em operação.

A manutenção em transformadores de transmissão é de vital importância para conservá-los em boas condições de serviço. As práticas de manutenção para o qual se garanta essa finalidade se dividem em duas (MILASCH, 1984):

- *Manutenção preventiva* é todo serviço programado de controle, conservação e restauração dos equipamentos, obras ou instalações executadas com a finalidade de mantê-las em condições satisfatórias de operação e de prevenir contra possíveis ocorrências que acarretam a sua indisponibilidade.
- *Manutenção corretiva* é todo serviço efetuado em equipamentos, obras e instalações com a finalidade de corrigir as causas e efeitos motivados por ocorrências constatadas que acarretam, ou possam acarretar, sua indisponibilidade em condições quase sempre não programadas.

Contudo, os transformadores e seus componentes devem estar sempre sob vigilância para garantir que cumpram com segurança e eficiência a função para o qual foram designados.

2.2.1 ÓLEO MINERAL ISOLANTE

O óleo mineral isolante utilizado em equipamentos elétricos é um líquido quase transparente, que consiste basicamente de hidrocarbonetos, que incluem parafinas, isoparafinas, naftalenos e aromáticos derivados da destilação do petróleo natural, da fração de 300 a 400 °C. Os óleos brutos do petróleo são os mais comuns líquidos isolantes, no entanto, outros óleos também usados, são os hidrocarbonetos sintéticos e halogêneos e para aplicações muito elevadas de temperaturas, usa-se óleo de silicone e hidrocarbonetos fluorados, além do óleo vegetal. Seu processo de obtenção inicia-se com a destilação do petróleo bruto, passando por um processo de refinação para remoção dos compostos não hidrocarbônicos, e a remoção de compostos ácidos e insaturados.

São classificados em dois tipos: tipo A de base naftênica e tipo B de base parafínica. Essa classificação é feita em respeito ao petróleo básico do qual foi refinado segundo a resolução ANP nº 36 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP nº 36, 2008).

Em condições reais de serviço, a resistência à ruptura da rigidez dielétrica diminui consideravelmente devido a presença de impurezas fibrosas, gotas de água e gases dissolvidos. A água pode existir no óleo sob a forma dissolvida, não dissolvida (em suspensão) ou livre (depositada) (MILASCH, 1984). O grau de refino e a temperatura do óleo são importantes para se controlar o nível de água no mesmo. A quantidade de água dissolvida no óleo é diretamente proporcional ao aumento da temperatura e a qualidade do refino do óleo é inversamente proporcional a solubilidade da água no óleo. A presença de até 0.01% de água no óleo, faz baixar a resistência dielétrica de 20% do valor do óleo seco, e a presença de impurezas fibrosas faz baixá-la muito mais fortemente (WADHWA, 2007). Algumas propriedades físicas e elétricas, são importantes para seleção de qualquer líquido isolante, entre elas, incluem rigidez dielétrica, condutividade elétrica, constante dielétrica, ponto de fulgor, teor de gás, viscosidade, fator de dissipação, estabilidade térmica, etc. A tabela a seguir mostra as propriedades de alguns dielétricos líquidos utilizados em equipamentos elétricos.

Tabela 1 – Propriedades dielétricas de alguns líquidos.

Nº	Propriedades	Óleo Transformador	Óleo Capacitor	Óleo Cabos	Óleo Silicone
1.	Permissividade relativa 50 Hz	2.2 - 2.3	2.1	2.3 – 2.6	2.7 – 3.0
2.	Rigidez dielétrica (20 °C 2.5 mm)	12 kV/mm	18 kV/mm	25 kV/mm	35 kV/mm
3.	(a) Tan δ 50HZ	10^{-3}	2.5×10^{-4}	2×10^{-3}	10^{-3}
	(b) 1 kHz	5×10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
4.	Resistividade (ohm-cm)	$10^{12} - 10^{13}$	$10^{13} - 10^{14}$	$10^{12} - 10^{13}$	2.5×10^{14}
5.	Teor de água admissível (ppm)	50	50	50	< 40
6.	Valor ácido (mg/gm de KOH)	Zero	Zero	Zero	Zero
7.	Saponificação (mg KOH/gm óleo)	0.01	0.01	0.01	< 0.01
8.	Peso específico (20 °C)	0.89	0.89	0.93	1.0 – 1.1

Fonte: Adaptado de WADHWA;(2007).

2.2.2 TEORIA DA QUEBRA DO ISOLAMENTO LÍQUIDO

Como já foi mencionado, os líquidos isolantes não são quimicamente puros, contém impurezas como bolhas de gases e partículas em suspensão. Estas impurezas tem um efeito significativo sobre a rigidez dielétrica dos isolantes líquidos. Os mecanismos de deterioração do óleo são consideravelmente agravados com a presença destas impurezas. Esses mecanismos de degradação em óleo isolantes dependem de diversos fatores, tais como, a natureza e as condições dos eletrodos, as propriedades físicas do líquido e as impurezas e os gases presentes no líquido (NAIDU,1995).

As teorias propostas para se explicar esse colapso em líquidos, são classificadas na seguinte ordem: repartição eletrônica, mecanismo de partículas sólidas em suspensão, ruptura por cavitação e volume de óleo estressado.

2.2.2.1 REPARTIÇÃO ELETRÔNICA

Quando um elétron é injetado no líquido isolante, ele ganha energia do campo elétrico aplicado entre os eletrodos, esses elétrons são acelerados sob a influência do campo e irão ganhar energia suficiente para se chocar com outros elétrons, e assim iniciar o processo de avalanche. A condição limite para o início da avalanche é alcançada quando a energia absorvida pelo elétron é igual à energia perdida durante a ionização (WADHWA, 2007).

Na equação 1, pode ser visto essa condição.

$$e\lambda E = Ch\nu, \quad (1)$$

Onde λ é o caminho médio, $h\nu$ é a energia de ionização e C é uma constante.

2.2.2.2 MECANISMO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS EM SUSPENSÃO

Os líquidos isolantes sempre contêm impurezas sólidas, sejam fibras ou partículas sólidas dispersas. A permissividade das partículas sólidas e_1 , será sempre diferente das do líquido e_2 . Assumindo que essas partículas são esféricas de raio r , aplicadas em um campo elétrico E , as mesmas ficam polarizadas e submetidas a uma força dada pela equação 2.

$$F = r^3 \frac{e_1 - e_2}{e_1 + 2e_2} E \frac{dE}{dx}, \quad (2)$$

essa força é dirigida para um local de maior estresse se $e_1 > e_2$ e para um lugar de menos estresse se $e_1 < e_2$, quando e_1 é a permissividade de bolhas de gases. A força dada acima aumenta à medida que a permissividade das partículas em suspensão aumenta (WADHWA, 2007).

Assim, a força tenderá a fazer com que a partícula avance para regiões mais fortes do campo. Uma vez que a permissividade dessas partículas é maior que a do líquido, sua presença na região de campo uniforme causará uma concentração do fluxo na superfície, e se outras partículas estiverem presentes serão atraídas, ocasionando uma concentração mais elevada de fluxo (WADHWA, 2007).

Sendo a grande quantidade de partículas presentes, essa força faz com que elas permaneçam alinhadas formando uma ponte sobre o fosso. O campo, no líquido entre a abertura irá aumentar até atingir seu valor crítico, ocasionando a ruptura do dielétrico no lugar. Sendo o número de partículas insuficiente para formar a ponte, as mesmas irão dar origem a uma melhoria no campo local, mas se o campo exceder a força dielétrica do líquido, ocorrerá uma desagregação local próximo as partículas e, portanto, levando a ruptura do líquido (WADHWA,2007).

Torna-se notável que a resistência à ruptura do dielétrico líquido, depende da concentração de partículas, raio r da partícula, a viscosidade do líquido e temperatura. Pode-se ainda ressaltar que o líquido que contém impurezas sólidas apresenta uma força dielétrica mais baixa do que em sua forma pura.

2.2.2.3 RUPTURA POR CAVITAÇÃO

Tem sido observado experimentalmente que, em muitos líquidos, a força de ruptura depende fortemente da pressão hidrostática aplicada. A cavitação é o nome que se dá ao fenômeno de vaporização ao líquido pela redução da pressão, durante seu movimento. Sugere-se que a mudança de fase do meio está envolvida no processo de degradação, por outras palavras, significa que uma espécie de bolha de vapor formado é responsável pela ruptura (NAIDU, 1995).

Os processos responsáveis pela formação dessas bolhas são: bolsas de gás na superfície dos eletrodos, forças de repulsão eletrostática entre as cargas que são suficientes para ultrapassar a tensão superficial, produtos gasosos devido à dissociação das moléculas do líquido por colisão dos elétrons e a vaporização do líquido pelo efeito corona, devido à presença de pontas e irregularidades na superfície do eletrodo.

2.2.2.4 MECANISMO DE DEGRADAÇÃO TÉRMICA

Outro mecanismo proposto para explicar a ruptura quando o óleo é submetido a pulsos de corrente é a degradação térmica. Este mecanismo baseia-se em observações experimentais de correntes extremamente grandes, imediatamente antes da ruptura do dielétrico (NAIDU, 1995). Estes pulsos de corrente de alta densidade, dão origem a um aquecimento no óleo, o qual pode conduzir a formação de bolhas de vapor.

Quando uma bolha é formada, devido ao seu alongamento para um tamanho crítico, ou quando se preenche completamente o espaço entre os eletrodos resulta-se na avaria do dielétrico e irá ocasionar a formação de uma faísca.

2.2.2.5 VOLUME DE ÓLEO ESTRESSADO

Nos líquidos comerciais onde os vestígios de impurezas estão presentes, a rigidez dielétrica é determinada pela maior quantidade de impureza possível. Isso

significa que, a rigidez dielétrica do óleo isolante é definida pela região onde o óleo seria mais fraco, ou seja, a região que em que o volume de óleo é submetido a maiores esforços. Em campos não uniformes, o volume de óleo é tomado como o volume estressado, que está contido entre a tensão máxima ($E_{máx}$) de contorno e $(0,9E_{máx})$. De acordo com essa teoria, a força de ruptura é inversamente proporcional à quantidade de óleo estressado (NAIDU, 1995).

A tensão de avaria do dielétrico líquido, é altamente influenciada pela concentração de gás no óleo, a viscosidade do óleo e a presença de outras impurezas. Essas impurezas distribuídas uniformemente, resulta no aumento do volume de óleo estressado que conseqüentemente reflete na redução da tensão de ruptura do dielétrico.

2.2.3 ACOMPANHAMENTO DO ÓLEO ISOLANTE EM SERVIÇO

Durante o período em que o transformador se encontra em serviço, os isolamentos sólidos e líquidos passam por processo de envelhecimento devido à água e ao calor. A deterioração das isolações sólida e líquida se realiza em presença de catalisadores (ferro, cobre, água, etc.). Os produtos da deterioração da isolação podem também agir como catalisadores e aceleradores do processo (MILASCH, 1984). Esse processo viabiliza o surgimento de condições propícias à formação de descargas parciais que levam a ionização, condução e formação de corona, até que haja falha no isolamento.

Torna-se, importante e necessário o acompanhamento do envelhecimento da isolação do transformador. Para isso, o engenheiro responsável deve realizar testes e ensaios periódicos, para analisar as condições de deterioração da isolação, constatar falhas incipientes e tomar medidas para evitar o envelhecimento prematuro e a progressão da falha incipiente, resultando na destruição do transformador.

Algumas recomendações são feitas através de ensaios físico-químicos para o acompanhamento das condições da isolação do transformador, a tabela a seguir demonstra os principais testes e quais métodos normativos são utilizados.

Tabela 2 - Testes realizados no óleo isolante.

TESTE	MÉTODOS
1. Tensão interfacial	NBR – 6234
2. Acidez	NBR – 14248
3. Fator de perdas dielétricas	NBR – 12133
4. Cor	NBR – 14483
5. Rigidez dielétrica	NBR – 6869 e IEC - 156
6. Teor de água	NBR – 10710
7. Densidade	NBR – 7148
8. Índice de refração	NBR – 5778

- Tensão interfacial

A tensão interfacial entre o óleo e a água detecta contaminantes polares solúveis e produtos de oxidação. É a tensão na interface óleo – água e é medida em dina/cm (*milinewton/metro*)

Essa característica varia com a rapidez durante estágios iniciais de envelhecimento, mas tende a estabilizar quando a deterioração é ainda moderada. Uma rápida diminuição da tensão interfacial pode também ser uma indicação de problemas de compatibilidade entre o óleo e alguns materiais do transformador ou de contaminantes durante o enchimento com óleo.

- Acidez

O índice de neutralização do óleo é a medida dos componentes ácidos presentes no mesmo. Sendo medido pelo número de miligramas de KOH necessário para neutralizar 1 g de óleo. Os ácidos têm um impacto da degradação dos materiais celulósicos e podem também ser responsáveis pela corrosão de peças de metal de um transformador.

- Fator de perdas dielétricas

O fator de perdas dielétricas e resistividade são parâmetros muito sensíveis a presença de contaminantes polares solúveis, produtos de envelhecimento ou colóides no óleo. Valores altos de fator de dissipação dielétrica ou valores baixos de resistividade podem afetar prejudicialmente o fator de potência e/ou a resistência de isolamento do equipamento elétrico.

- Cor

A cor de um óleo isolante é determinada pela luz transmitida e é expressa por um valor numérico baseado na comparação com uma série de padrões e cores. Não é uma propriedade crítica, mas pode ser útil para avaliação comparativa. Um número de cor que aumenta rapidamente ou muito alto pode ser uma indicação de deterioração ou contaminação do óleo.

- Rigidez dielétrica

É a tensão alternada na qual ocorre a descarga disruptiva na camada de óleo situada entre dois eletrodos e em condições perfeitamente determinadas (MILASCH, 1984). A rigidez dielétrica é uma medida da capacidade do óleo resistir a solitação elétrica. Esse ensaio objetiva verificar a pureza do produto, evidenciando a presença de agentes contaminadores, como água, sujeira, fibras celulósicas úmidas ou partículas condutoras no líquido, por conseguinte, a qualidade dos processos de fabricação, transporte e manuseio.

- Teor de água

O ensaio consiste na determinação, através de reações químicas, da quantidade de água presente na amostra de óleo sob análise. Há duas causas para o aumento da água na isolação do transformador: a entrada de umidade proveniente da atmosfera e a degradação da celulose e óleo.

A determinação do teor de umidade na isolação líquida pode dar uma ideia do estado de evolução do processo de deterioração não só dela mas também da isolação sólida (MILASCH, 1984).

- Densidade

A densidade é usada para identificação do tipo de óleo, de base naftênico ou base parafínica. Valores de referência são especificados em norma, caso haja diferenças isso pode indicar contaminação do óleo por outros líquidos. A densidade relativa do óleo, isto é, a relação entre a massa de determinado volume de óleo e a massa de igual volume de água pura na temperatura de 15 °C (MILASCH, 1984).

- Índice de refração

O índice de refração tem como objetivo a identificação da pureza das amostras utilizadas nos ensaios com o óleo mineral isolante, para verificação de suas qualidades.

2.2.4 TRATAMENTO DO ÓLEO ISOLANTE

A escolha do método ou processo de tratamento do óleo isolante depende das condições e do estado em que se encontrar. O óleo é chamado de contaminado quando contém umidade e partículas em suspensão, excluindo-se os produtos de sua oxidação. Óleo deteriorado é aquele que sofreu oxidação, possuindo, portanto, ácidos orgânicos e sedimento ou borra (MILASCH, 1989).

A recuperação é o tratamento utilizado para o óleo deteriorado, com a finalidade de eliminar os produtos da oxidação, contaminantes ácidos e em estado coloidal, por meios químicos e de adsorção.

O tratamento do óleo contaminado para remover, por meios mecânicos, a umidade e as partículas sólidas em suspensão é chamado de condicionamento do óleo.

A filtração é um método de condicionamento. Esse processo é feito com a utilização de papel filtro. Com a filtração consegue-se remover a água não-dissolvida e as partículas sólidas em suspensão. Suas partes principais são o filtro e a bomba de vácuo. O óleo, impulsionado pela bomba, atravessa o papel filtro sendo assim possível a aceleração da filtração da amostra de óleo.

2.3 INSULATING OIL TESTER

O *Insulating Oil Tester*, também pode ser chamado de Medidor de rigidez dielétrica. Equipamentos desse tipo são comumente utilizados em laboratório para ensaios de pureza do óleo, qualidade e composição química. Na figura 1 pode ser visualizado a fotografia do equipamento.

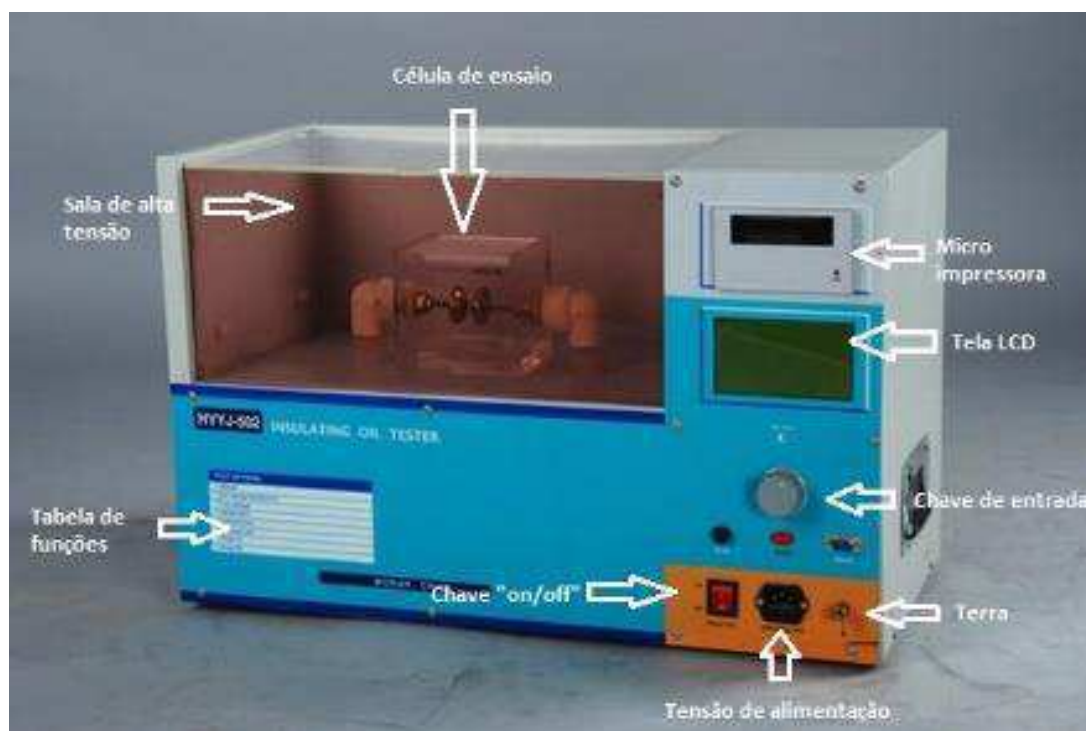


Figura 1 – Imagem detalhada do Medidor de rigidez dielétrica
(FONTE:http://www.bombayharbor.com/Product/29976/Insulation_Oil_Tester.html).

Para utilização do equipamento o fabricante orienta certificar sobre a calibração do mesmo. Detalhes de sua utilização como, temperatura do ambiente, humidade, tensão de alimentação, padrões do instrumento e inspeção dos resultados através da exatidão das leituras, devem estar de acordo com o especificado pelo fabricante.

O equipamento apresenta algumas características específicas para seu funcionamento. A tensão de alimentação suportável na entrada do instrumento deve ser AC 220V \pm 10%, proporcionando uma tensão de saída AC variável de 0 V até 100 kV que é aplicada sobre o isolante líquido através dos eletrodos. A taxa de aumento da tensão aplicada sobre o óleo pode variar de 0.5k V/s \pm 5%, 2k V/s \pm 5%, 3k V/s \pm 5% ou 5k V/s \pm 5%. O erro de medição em leituras pode ser tolerável em até no máximo

3% para um intervalo de 10 kV até 100 kV. O equipamento pesa em torno de 41 kg e suas dimensões são de 630 mm*400 mm*3000 mm.

Na parte inferior do lado esquerdo, se encontra uma lista com as principais funções de teste do instrumento. Na tabela 3, estão os testes que podem ser selecionadas pelo usuário, no manejo do equipamento.

Tabela 3 - Principais funções.

PRINCIPAIS FUNÇÕES
1. Manual
2. IEC156/IS67792/BS5874
3. User-defined
4. ASTM D877
5. ASTM D1816
6. 5 minute test
7. Proof 'A'
8. Proof 'B'

O teste “Manual”, o usuário pode realizar o ensaio de forma manual, controlando a aplicação de tensão, podendo aumentá-la ou diminuí-la pressionando a chave de seleção. Os parâmetros do teste podem ser visualizados na tela quando selecionado. “User-defined” é utilizado para configuração dos parâmetros do teste, podendo ser alterados utilizando essa função. “5 minute test” é um teste modelo rápido, podendo ser utilizado para demonstração do equipamento. Os testes “IEC156/IS67792/BS5874”, “ASTM D877” e “ASTM D1816” são testes referenciados por norma, quando selecionados na tela aparece os parâmetros utilizados no ensaio.

Os testes “Proof A” e “Proof B”, apresentam um processo de teste diferente dos testes citados anteriormente, onde se recebe a tensão de ruptura. Para esse tipo de ensaio, o objetivo principal é descobrir se a amostra sofrera ruptura quando submetida a uma tensão em um intervalo de tempo já definidos.

Na lateral esquerda ao topo, se encontra a sala de alta tensão, onde estão localizados os eletrodos e a cuba onde é depositado o óleo mineral isolante. A porta da sala de alta tensão tem como principal função o isolamento, esta deve estar sempre fechada quando o teste estiver em andamento, caso a porta seja aberta durante o ensaio, automaticamente será interrompido o fornecimento de tensão para o transformador.

Ao topo no lado direito, se encontra a micro impressora onde se pode imprimir os resultados dos ensaios realizados. Logo abaixo está a tela de LCD, que serve como

uma interface digital do equipamento, os parâmetros e resultados dos testes são mostrados nessa tela. Logo abaixo da tela, se encontra a unidade de ajuste de calibração, que é responsável pela exatidão da calibração. A chave de entrada é utilizada para selecionar as opções que aparecem na interface de LCD do equipamento. A chave possui três movimentos básicos para interagir com a interface, virar à direita e virar à esquerda são teclas de seleção do menu e apertando-a funciona como tecla de seleção ou ok. Na parte inferior a direita se encontra a entrada da tensão que alimenta o equipamento, a conexão de aterramento e uma chave “on/off”.

Com a fonte de alimentação ligada, na tela LCD aparecerá o menu principal com quatro opções de seleção, conforme a figura 2.

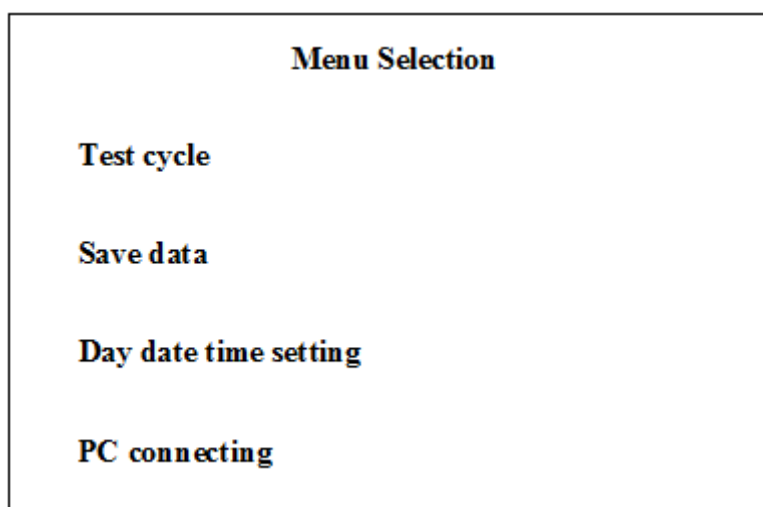


Figura 2 - Menu principal.

O segundo item do menu principal é “Save data”. Selecionando este item o usuário poderá visualizar novamente os dados que foram salvos através dessa função. O terceiro item “Day date time setting” é usado para configurar data e hora do equipamento. O quarto item “PC connecting”, ao ser selecionado o usuário poderá carregar todos os dados salvos no equipamento para um computador, por um aplicativo.

Selecionando o primeiro item “Test Cycle”, na tela do menu principal será visto uma nova tela com os itens do menu teste de seleção, como é visto na figura 3.

Menu Selection	[Return]
[Manual]	
[IEC156/IS67792/BS5874]	
[User-defined]	[ASTM D877]
[ASTMD1816]	[5 minute test]
[Proof 'A']	[Proof 'B']

Figura 3 - Menu de seleção de teste.

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 MATERIAL

Para o estudo em questão, foram avaliadas três amostras de óleo mineral isolante que são utilizados em diferentes equipamentos:

- Amostra 1: óleo mineral utilizado em um transformador de 100 kVA;
- Amostra 2: óleo mineral utilizado em um regulador de tensão de 300 kVA;
- Amostra 3: óleo mineral utilizado em um disjuntor de 31,5 kA.

Todas as amostras foram adquiridas no Laboratório de Alta Tensão (LAT). As referidas amostras foram retiradas dos seus respectivos equipamentos por motivos de manutenção ou substituição definitiva e estavam armazenadas em recipientes.

Utilizou-se uma estufa para que fosse retirada a humidade contida nas amostras de óleo. Foi verificado a temperatura do ambiente com um termômetro, averiguando as condições adequadas para a realização do ensaio.

O medidor de rigidez dielétrica, junto com a cuba com os eletrodos esféricos foi utilizado para os ensaios com as amostras de óleo. Os resultados das medições são

comparados com valores tabelados por normas para verificar se o óleo servirá para o uso em equipamentos com isolamento elétrico líquido.

Tabela 4 – Valores teóricos de rigidez dielétrica e estado do óleo isolante.

Valores de rigidez dielétrica	Estado do óleo
Acima de 35 kV	Excelente
De 30 a 35 kV	Muito Bom
De 25 a 30 kV	Bom
De 20 a 25 kV	Satisfatório
De 15 a 20 kV	Duvidoso (recomenda-se filtração)
Abaixo de 15 kV	Rejeitável (indispensável urgente filtração)

Fonte: Adaptado de Guia de Experimentos – Lab. de Materiais Elétricos – *Determinação da Rigidez Dielétrica de Óleos Isolantes*, UFCG/DEE/LAT (2003).

Para o acondicionamento do óleo, é usado o método de filtração. No procedimento de filtragem do óleo é utilizado a estufa para a secagem dos papéis filtro, assim como também para aquecimento do óleo e evaporação da água existente em outros materiais utilizados. Com a utilização da bomba de vácuo, e com a conjuntura béquer, funil, papéis filtro e borracha de apoio, pode ser realizado o tratamento do óleo impuro.

3.1 METODOLOGIA DO ENSAIO

A metodologia aqui descrita objetiva a realização dos ensaios com três amostras diferentes de óleo mineral isolante, utilizando o medidor de rigidez dielétrica e o método de acondicionamento do óleo. Sendo feita uma comparação e verificação dos resultados e o estado de cada amostra para que possa ser indicado um tratamento adequado ao óleo mineral impuro.

O tratamento para o óleo contaminado é o acondicionamento da amostra através do processo de filtração. Com a filtração consegue-se remover a água e as partículas sólidas em suspensão.

3.1.1 ENSAIO COM O MEDIDOR DE RIGIDEZ DIELÉTRICA

Inicialmente as três amostras depois de identificadas, foram colocadas na estufa para que fosse retirada a humidade contida em cada amostra. Foi verificado com o termómetro, a temperatura do ambiente em torno de 24 °C onde foi realizado o ensaio. De acordo com as especificações em norma a temperatura do local onde se realizará o ensaio deve estar entre 20 °C e 30 °C para condições satisfatórias dos resultados.

Para a preparação do equipamento, foi utilizado um fio para o aterramento de sua carcaça e um cabo de alimentação ligado em 220 V a.c.

Os procedimentos descritos a seguir foram feitos de forma sequencial para todas as três amostras em ordem crescente e os resultados obtidos foram preenchidos em tabelas, contidas no capítulo quatro, referente aos resultados.

Os ensaios realizados com as amostras seguem as especificações contidas na IEC 156, onde nessa norma os eletrodos usados para o teste são esféricos. No teste utilizado, os eletrodos foram previamente limpos e a distância entre eles foi ajustada para 2,54 mm (0,1 polegada) durante os ensaios.

Iniciando o ensaio, os recipientes que continham as amostras foram suavemente agitados para que as eventuais partículas suspensas no líquido pudessem ficar em suspensão. A preparação da cuba com o preenchimento do óleo foi feita de maneira vagarosa para se evitar a oclusão do ar (formação de bolhas), até uma altura que cubra os eletrodos, equivalente a um volume de 400 ml especificado na cuba. A cuba foi colocada no local do ensaio e a tampa foi fechada, conforme indicação do fabricante para manter o local de aplicação da tensão isolado. Certificando-se da fixação do encaixe da cuba e o fechamento da tampa, o equipamento foi ligado, aparecendo na tela de LCD as opções para serem seleccionadas através do botão de seleção. A opção “test cycle” foi seleccionada direccionando para outra tela, onde estão todos os testes possíveis para a realização dos ensaios referenciados por normas. Foi seleccionado o teste “[IEC60156/IS6792/BS5874]” referente a norma IEC 156, onde aparece na tela todas as especificações do ensaio. O referente teste consiste na aplicação de tensão a uma taxa de variação de 2 kV/s, para obtenção de seis medições da rigidez dielétrica da amostra em ensaio e a média aritmética dessas leituras resulta no valor da rigidez dielétrica da amostra. Para iniciar a primeira aplicação de tensão é esperado um intervalo de cinco minutos para que o ar ocluído possa escapar, após a primeira leitura um intervalo de dois minutos é esperado entre o termino da aplicação de tensão e o início da próxima.

Ao fim de cada aplicação o valor da medição é visualizado na tela. No final do processo as seis leituras são mostradas e a média aritmética que corresponde ao valor da rigidez dielétrica também pode ser visualizado, tanto quanto o desvio padrão das medições e a razão entre a média e o desvio, que podemos chamar de coeficiente de variação. Quando o teste é totalmente completado, pode-se imprimir ou salvar os resultados.

3.1.2 FILTRAÇÃO DO ÓLEO

Uma vez que a presença de umidade e partículas em suspensão no óleo pode influenciar nos valores obtidos para a sua rigidez dielétrica, foi realizado o processo de filtração em uma das amostras, e novas medições foram realizadas. A amostra 1, referente ao transformador de 100 kVA, foi utilizada nessa etapa por apresentar os menores valores de rigidez dielétrica. Para o processo de filtragem foi necessário a bomba de vácuo, funil, papéis filtro e o béquer como pode ser visto na figura 4.



Figura 4 - Conjuntura bomba de vácuo, funil, papéis filtro e béquer.

Inicialmente foram colocados os papéis filtro e o béquer na estufa por aproximadamente 15 minutos, para poder retirar a umidade presente nos materiais. Os papeis são colocados no funil, que é encaixado no béquer com o auxílio de uma borracha para vedação e fixação. O processo de filtragem se inicia com o auxílio da bomba de vácuo, forçando a passagem do óleo pelo papel filtro. Foram utilizados dois

papéis filtro por vez em cada filtração. O processo de filtração é repetido algumas vezes, obtendo-se um melhor tratamento do óleo. A retenção das impurezas pode ser vista nos papéis filtro utilizados, conforme a figura 5.



Figura 5 - Papéis filtro utilizados.

Após 5 filtrações, foi feito um ensaio com o medidor da rigidez dielétrica, a fim de analisar a evolução da amostra a cada passo do condicionamento. A amostra foi colocada na estufa por um período de 12 horas a uma temperatura de 60 °C, para o aquecimento do óleo e retirada da umidade. O óleo foi retirado da estufa. Aguardado seu resfriamento até atingir a temperatura ambiente, foi repetida a mesma metodologia do ensaio com o medidor de rigidez dielétrica para a amostra tratada. Foram feitas mais duas filtrações e a amostra foi colocada na estufa por aproximadamente 15 minutos a uma temperatura em torno de 60 °C. Após o resfriamento foi feito novamente o ensaio com o medidor de rigidez dielétrica.

Todos os resultados dos ensaios feitos no processo de filtração estão no capítulo 4, referente aos resultados desse trabalho.

4 RESULTADOS

Os resultados deste trabalho estão resumidos na confecção do material didático e nos resultados das medições da rigidez dielétrica para as três amostras citadas anteriormente. O material didático “Determinação da rigidez dielétrica de óleo isolante”, que consta no Apêndice A, foi elaborado para facilitar o contato do estudante com o equipamento, auxiliando no entendimento e a importância do óleo isolante em serviço para um bom funcionamento dos equipamentos.

Foram realizados três ensaios sendo um para cada amostra, no total de seis medições da tensão de ruptura do dielétrico líquido, podendo observar ainda ao final de cada medida a formação de uma pequena descarga elétrica entre os eletrodos, momento em que ocorre a ruptura do dielétrico. Foi realizado ainda o condicionamento da amostra 1, sendo a filtração o tratamento utilizado. Mostrando a evolução do óleo a cada etapa realizada no tratamento, através de ensaios com o medidor de rigidez dielétrica.

Todos os procedimentos e especificações foram seguidos segundo orientação das normas vigentes do ensaio e orientações da utilização correta do equipamento pelo fabricante, visando conseguir resultados favoráveis para os ensaios.

Os valores do desvio padrão fornecidos pelo equipamento nos ensaios, indica a dispersão dos dados dentro da amostra, ou seja, é o quanto os resultados das seis medições diferem da média que indica o valor da rigidez dielétrica real. É importante ter em mente que quanto menor o desvio padrão, mais homogênea é a amostra.

4.1 CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO

O teste realizado se caracteriza como um ensaio de rotina, onde se é verificado as condições adequadas de funcionamento do óleo. O óleo mineral utilizado em transformadores deve apresentar uma tensão de ruptura com valor nominal de 30 kV, para condições normais de funcionamento.

O método utilizado no ensaio foi a configuração de eletrodos esféricos, com espaçamento de 2,54 mm entre os eletrodos como especificado na norma IEC 156. A temperatura do ambiente medida na realização do ensaio foi de 26 °C.

O método utilizado de tratamento do óleo contaminado foi a filtração. A remoção, por meios mecânicos, da umidade e das partículas sólidas em suspensão do óleo.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os valores obtidos nos ensaios realizados com o medidor de rigidez dielétrica para as amostras 1,2 e 3 se encontram na tabela 5.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios.

Leitura	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
1°	5.6 kV	6.3 kV	7.9 kV
2°	4.2 kV	7.7 kV	6.8 kV
3°	4.5 kV	8.9 kV	8.5 kV
4°	6.0 kV	9.5 kV	6.7 kV
5°	4.7 kV	9.9 kV	5.1 kV
6°	6.5 kV	11.7 kV	6.3 kV
Média	5.2 kV	9.0 kV	6.8 kV
Desvio padrão	0.9 kV	1.8 kV	1.2 kV

Para avaliar as medidas obtidas na tabela 6, se torna necessário fazer uma verificação de natureza estatística, o próprio equipamento faz essa avaliação fornecendo o cálculo da razão entre do desvio padrão e a média. O critério seguido para avaliar essas medidas é descrito pela razão entre o desvio padrão e a média dos 6 valores individuais. Se essa relação for maior do que 0,1 é provável que o desvio padrão das 6 medidas seja excessivo e portanto, o erro provável da média também o seja.

As equações 3 e 4 são referentes a média dos 6 valores e o desvio padrão:

$$\bar{x} = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^6 x_i, \quad (3)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{5} (\sum_{i=0}^6 (x_i - \bar{x})^2)}, \quad (4)$$

onde:

- \bar{x} = média das seis tensões;
- x_i = tensão de ruptura obtida na medida;
- s = desvio padrão.

Os valores calculados pela razão entre o desvio padrão e a média dos seis valores são demonstrados na tabela 6.

Tabela 6 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Média (\bar{x})	5.2 kV	9.0 kV	6.8 kV
Desvio padrão (s)	0.9 kV	1.8 kV	1.2 kV
Coeficiente de variação ($\frac{s}{\bar{x}}$)	0.17	0.2	0.17

As medidas das amostras 1, 2 e 3 contidas nas tabelas apresentam valores de rigidez dielétrica bem abaixo dos valores de aceitação do óleo para utilização em serviço, classificando todas as amostras como contaminadas e indispensável filtração urgente das mesmas. Essas medidas obtidas comprovam que as amostras de óleo apresentam agentes contaminantes, como água, sujeira, fibras celulósicas úmidas ou partículas condutoras no líquido, podendo um ou mais estar presente em concentrações significativas quando se apresenta tensões de ruptura baixas. Isso se justifica pelo fato das amostras já terem sido utilizadas em equipamentos em serviço por alguns anos e pelo fato de estarem armazenadas em recipientes sujeitos a problemas de estanqueidade.

Analisando o critério estatístico, os valores calculados do coeficiente de variação, apresentam valores um pouco acima do limite tolerável que é de 0,1. A extrapolação do limite é devida as medidas de rigidez dielétrica do teste se dispersarem um pouco e não apresentarem valores próximos, isso se dá pela instabilidade do óleo devido a presença de água e impurezas.

O valor nominal da rigidez dielétrica do óleo mineral em condições normais de serviço é de 30 kV. Esse valor quando comparado com os valores de rigidez dielétricas das amostras 1, 2 e 3 apresenta uma discrepância bastante elevada entre as medidas.

Para uma avaliação dos resultados obtidos anteriormente, será feito o tratamento do óleo por filtração, o qual foi dividido em três etapas. A cada etapa durante o processo

de condicionamento do óleo, foi feita uma medição da rigidez dielétrica da amostra. Os valores obtidos das medições com a amostra 1 podem ser vistos na tabela 7.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios no tratamento do óleo.

Leitura	Medição 1	Medição 2	Medição 3
1°	21.8 kV	28.1 kV	32.3 kV
2°	23.2 kV	24.8 kV	29.9 kV
3°	23.1 kV	25.0 kV	34.1 kV
4°	25.4 kV	224.3 kV	33.1 kV
5°	27.3 kV	22.7 kV	33.1 kV
6°	27.2 kV	25.1 kV	26.4 kV
Média (x)	24.6 kV	25.0 kV	31.4 kV
Desvio padrão (s)	2.3 kV	1.7 kV	2.8 kV
Coefficiente de variação ($\frac{s}{\bar{x}}$)	0.09	0.07	0.09

A medição 1 é referente ao primeiro passo do tratamento, onde foram feitas cinco filtrações com a amostra contaminada. Observou-se um aumento considerável da rigidez dielétrica devido a filtração, onde são removidas as partículas sólidas e a água não dissolvida. Em relação ao valor nominal da rigidez dielétrica do óleo, há um condicionamento de 64,6% da amostra 1.

A medição 2 foi feita após retirar a amostra da estufa, que ficou por mais de 12 horas, para remoção das partículas de água e umidade. Não foi notado um aumento considerável em relação a medição anterior, porém o óleo manteve o valor de sua rigidez dielétrica estável.

A medição 3 foi feita após a realização de mais duas filtrações e colocado o óleo na estufa por aproximadamente 15 minutos. Observou-se uma elevação nos valores da rigidez dielétrica, devido à remoção da umidade e partículas sólidas ainda presentes no óleo. Pode-se notar um condicionamento de 87,3% da amostra 1, depois dessa última medição, apresentando um valor aceitável de sua rigidez dielétrica exigido por norma.

Os coeficientes de variação nas três medições realizadas apresentam valores abaixo do limite tolerável que é 0.1, o que garante a validade dos ensaios e a consistência dos valores medidos.

Com os resultados obtidos acima, foi comprovado a existência de agentes contaminantes, como água, sujeira, fibras celulósicas úmidas ou partículas condutoras no líquido, como foi justificado anteriormente com as amostras 1, 2 e 3. Pode-se evidenciar também a sensibilidade do óleo a presença de umidade e impurezas, pois a medida que era feito cada passo no processo de recondicionamento, o contato com esses agentes contaminantes altera os valores de rigidez dielétrica. Contudo é notável a eficácia do processo de recondicionamento por filtração, pelos valores obtidos nos ensaios após os procedimentos do tratamento relatados anteriormente.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo o estudo sobre a rigidez dielétrica do óleo mineral isolante, bem como elaborar um material didático para utilização do equipamento *Insulating Oil Tester* e avaliação dos seus resultados. Nesse sentido, verificou-se a necessidade do desenvolvimento de competências no que diz respeito ao conhecimento sobre o óleo mineral isolante e a avaliação da sua rigidez dielétrica através de normas vigentes e o equipamento medidor de rigidez dielétrica.

Uma revisão bibliográfica foi realizada a fim de situar os aspectos da engenharia sobre o óleo mineral isolante como dielétrico líquido de transformadores, verificando as prescrições das normas e o que a bibliografia sugere.

Abrangendo os aspectos práticos, o equipamento *Insulating Oil Tester* se apresentou bastante eficiente para auxiliar o engenheiro na execução de manutenção preditiva do óleo em serviço. Apresentando uma fácil instalação e uma interface bastante didática para sua utilização no momento da execução dos ensaios, disponibilizando ainda as opções do usuário imprimir os resultados ou salvá-los na memória do equipamento. No que diz respeito à execução do ensaio, o medidor de rigidez segue de forma sucinta as diretrizes que constam na norma referente ao ensaio. Especificações como o tempo de inicialização, o intervalo entre o término e o início de uma outra medição, a taxa de variação de tensão aplicada, entre outras, são todas respeitadas. Lembrando que condições externas do ambiente como temperatura são consideradas, assim proporcionando valores aceitáveis das medições realizadas pelo equipamento.

Afora os problemas deparados com as obtenções de resultados não satisfatórios de aceitação das amostras de óleo, o desenvolvimento do ensaio contribuiu para o entendimento do funcionamento do equipamento. Contribuindo ainda de maneira positiva para o entendimento das condições de aceitação do óleo nos ensaios realizados.

O tratamento do óleo isolante foi necessário e importante para uma comprovação prática da contaminação das amostras utilizadas nos primeiros ensaios. Ficando evidente a presença de água, umidade e impurezas, pois com o tratamento se observou um melhoramento dos valores de rigidez dielétrica do óleo. Vale salientar ainda a

eficácia do tratamento por filtração, pois mesmo não apresentando condições satisfatórias para o tratamento, se conseguiu uma melhoria da rigidez dielétrica.

Por fim, o trabalho cumpre seu objetivo quando oferece um material didático para utilização do medidor de rigidez dielétrica, enfatizando a importância dos testes de rotina para acompanhamento do estado do óleo mineral isolante em serviço.

BIBLIOGRAFIA

MILASCH, M. - *Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante*, São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1984.

WADHWA, C.L. - *High Voltage Engineering*, New Delhi, New Age International (P) Ltd, 2007.

NAIDU, M. S. KAMARAJU, V. - *High Voltage Engineering*, United States of America, McGraw-Hill Ltd, 1996.

PAIXÃO, L. A. - Avaliação da qualidade do óleo isolante em transformadores com o emprego da função discriminante quadrática [Tese de mestrado]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Matemática e Construção Civil; 2006.

FINOCCHIO, M. A. F. - Ascarel um risco ocupacional e suas alternativas de substituição [Trabalho de conclusão de curso]. Londrina: Universidade Estadual de Londrina, Curso de especialização em engenharia de segurança no trabalho; 1997.

ABNT - NBR - 6869 – Líquidos isolantes elétricos - Determinação da Rigidez Dielétrica (eletrodos de disco). Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]: ABNT. dez. 1989.

IEC. IEC 156 - Insulating liquids - Determination of the breakdown voltage at power frequency - Test method. [S.l.]: International Electrotechnical Commission. 1995.

ASTM. ASTM D877 - Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes. American Society for Testing and Materials. [S.l.]: ASTM. 2007.

ANP. ANP Resolução nº 36 - Dispõe sobre as especificações dos óleos minerais isolantes, comercializados em todo território nacional. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. [S.l.]: ANP. 5 dez. 2008.

ALTTATEC. Análises de óleos minerais e isolantes. Disponível em:
<<http://www.alttatec.com.br/analises.html>>. Acesso em: 28 jan. 2015.

BRASTRAFO. Brastrafo Serviço em Transformadores. Disponível em:
<<http://www.brastrafo.com.br/servicos>>. Acesso em: 2 fev. 2015.

APÊNDICE A



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Laboratório de Alta Tensão

**DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DIELÉTRICA DE ÓLEOS
ISOLANTES**

Campina Grande, Paraíba
Abril 2015

SUMÁRIO

1	Objetivos	3
2	Material utilizado	3
3	Fundamentação teórica.....	3
3.1	Determinação da rigidez dielétrica.....	3
3.1.1	Propriedades físicas dos óleos isolantes	4
3.1.2	Solubilidade da água no óleo	5
3.1.3	Propriedades elétricas dos óleos isolantes	6
3.1.4	Acompanhamento das condições do isolamento	6
3.2	Formação e extinção do arco elétrico.....	8
3.2.1	No óleo mineral isolante	8
3.2.2	No ar	9
4	Medidor de rigidez dielétrica.....	10
5	Roteiro experimental	11
5.1	Resumo do ensaio	11
5.2	Preparação da aparelhagem.....	12
5.2.1	Ajuste e cuidados com eletrodos e cubas.....	12
5.3	Temperatura do ensaio	13
5.4	Aplicação da tensão	13
5.5	Roteiro	15
6	Referências bibliográficas	17
7	Anexos.....	18

1 OBJETIVOS

Verificar os principais fatores que influenciam na rigidez dielétrica e o processo de restauração das condições de isolamento dos óleos minerais.

2 MATERIAL UTILIZADO

Serão utilizados os seguintes materiais:

- Equipamento Insulating Oil Tester (Medidor de rigidez dielétrica);
- 4 cubas (plano/plano, meia-esfera/meia-esfera, plano/ponta, ponta/ponta);
- Cabo para aterramento do equipamento;
- Estufa;
- Termômetro;
- Óleo mineral.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DIELÉTRICA

O óleo mineral isolante é o dielétrico líquido mais utilizado em equipamentos como transformadores, disjuntores, cabos de alta tensão e capacitores. O uso do óleo objetiva atender as seguintes finalidades:

- i. garantir o isolamento entre os componentes de transformadores, disjuntores e chaves;
- ii. auxiliar na extinção do arco elétrico nos disjuntores e chaves;

- iii. facilitar a transferência do calor (convecção e condução) produzido por perdas nos enrolamentos e no núcleo de transformadores (correntes parasitas e histerese magnética).

O líquido isolante de possuir determinadas características dentre as quais, as mais importantes são:

- elevada rigidez dielétrica;
- boa fluidez.

O **óleo mineral** é um líquido quase transparente, que consiste basicamente de hidrocarbonetos, que incluem parafinas, iso-parafinas, naftalenos e aromáticos derivados da destilação do petróleo natural. São classificados em dois tipos: tipo A de base naftênica e tipo B de base parafínica. Apresenta o inconveniente de acumular umidade e sofrer oxidação, o que reduz suas propriedades dielétricas, além do fato de ser inflamável. Apesar dessas desvantagens o óleo mineral é atualmente usado na maioria dos equipamentos que utilizam isolamento líquido.

Os óleos brutos do petróleo são os mais comuns líquidos isolantes, no entanto, outros óleos também usados, são os hidrocarbonetos sintéticos e halogêneos e para aplicações muito elevadas de temperaturas, usa-se óleo de silicone e hidrocarbonetos fluorados, além do óleo vegetal.

Para se verificar se um determinado óleo está em boas condições para ser utilizado como líquido isolante, se faz necessário uma série de ensaios, dos quais o de **rigidez dielétrica** é um dos mais importantes.

3.1.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS ÓLEOS ISOLANTES

Cor: A cor de um óleo isolante é determinada pela luz transmitida e é expressa por um valor numérico baseado na comparação com uma série de padrões e cores. Não é uma propriedade crítica, mas pode ser útil para avaliação comparativa. Um número de cor que aumenta rapidamente ou muito alto pode ser uma indicação de deterioração ou contaminação do óleo.

Ponto de fulgor: É a menor temperatura na qual se formam vapores inflamáveis na superfície do óleo. Os gases inflamáveis são perigosos, razão pela qual é importante

se conhecer a temperatura na qual os mesmos se formam. Um valor típico para ponto de fulgor é de 145 °C.

Ponto de fluidez: É a temperatura mais baixa na qual o óleo, em condições perfeitas estabelecidas, escoar. Sua determinação contribui para identificação dos tipos de óleos (parafínicos, naftênicos) e permite concluir em que espécie de aparelhos e em que condições pode ser utilizado. Um valor típico para o ponto de fluidez é de -26 °C, para o óleo parafínico e de -40 °C, para o óleo naftênico.

Densidade: A densidade relativa do óleo, isto é, a relação entre a massa de determinado volume de óleo e a massa de igual volume de água pura na temperatura de 15 °C. A densidade é usada para identificação do tipo de óleo, de base naftênico ou base parafínica. Valores de referência são especificados em norma, caso haja diferenças isso pode indicar contaminação do óleo por outros líquidos. Normalmente esses valores devem estar em torno de 0,9.

Viscosidade: A viscosidade é a resistência que o óleo oferece ao escoamento contínuo sem turbulência, inércia ou outras forças. A quantidade de calor que o óleo é capaz de transferir, por hora, do transformador para o meio ambiente (convecção), depende da viscosidade.

Tensão Interfacial: A tensão interfacial entre o óleo e a água detecta contaminantes polares solúveis e produtos de oxidação. É a tensão na interface óleo – água e é medida em dina/cm (*milinewton/metro*)

Essa característica varia com a rapidez durante estágios iniciais de envelhecimento, mas tende a estabilizar quando a deterioração é ainda moderada. Uma rápida diminuição da tensão interfacial pode também ser uma indicação de problemas de compatibilidade entre o óleo e alguns materiais do transformador ou de contaminantes durante o enchimento com óleo.

3.1.2 SOLUBILIDADE DA ÁGUA NO ÓLEO

A água pode existir no óleo sob a forma dissolvida, não dissolvida (em suspensão) ou livre (depositada). O grau de refino e a temperatura do óleo são importantes para se controlar o nível de água no mesmo, onde a quantidade de água dissolvida no óleo é diretamente proporcional ao aumento da temperatura e a qualidade do refino do óleo é inversamente proporcional a solubilidade da água no óleo. A presença de até 0.01% de água no óleo, faz baixar a resistência dielétrica de 20% do

valor do óleo seco, e a presença de impurezas fibrosas faz baixá-la muito mais fortemente.

3.1.3 PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS ÓLEOS ISOLANTES

Rigidez dielétrica: É a tensão alternada na qual ocorre a descarga disruptiva na camada de óleo situada entre dois eletrodos e em condições perfeitamente determinadas (MILASCH, 1984). A rigidez dielétrica é uma medida da capacidade do óleo resistir a solicitação elétrica. O ensaio, objetiva verificar a pureza do produto evidenciando a presença de agentes contaminadores, como água, sujeira, fibras celulósicas úmidas ou partículas condutoras no líquido, por conseguinte, a qualidade dos processos de fabricação, transporte e manuseio.

A rigidez dielétrica de um óleo isolante é afetada pela água nele dissolvida. Por exemplo, um óleo que tenha uma quantidade de água dissolvida de 120 ppm a 75°C, tem sua rigidez dielétrica reduzida em torno de 26,5% quando comparada com a sua rigidez dielétrica tendo uma quantidade de água dissolvida de 10 ppm a 75°C.

No óleo, a água em forma de gotículas diminui acentuadamente sua rigidez dielétrica. No óleo deteriorado, a água tem maior possibilidade de ficar em forma de gotículas que no óleo novo. Como a solubilidade da água no óleo cresce com a temperatura, quando a temperatura do óleo diminui, uma parte da água dissolvida passa para a forma de gotícula e sua rigidez dielétrica diminui.

Outro fator que contribui para a diminuição da rigidez dielétrica do óleo são as partículas sólidas em suspensão (fibras celulósicas, carvão, poeira, etc.). A rigidez dielétrica é tanto menor quanto maior a quantidade de partículas sólidas em suspensão. Fibras celulósicas em suspensão no óleo com água podem reduzir o valor da rigidez dielétrica em até 90%, enquanto que no óleo sem água a redução é de apenas 20%. Desta forma, pode-se concluir que o óleo deve ser manipulado com os cuidados necessários para evitar sua contaminação com água e partículas sólidas.

3.1.4 ACOMPANHAMENTO DAS CONDIÇÕES DO ISOLAMENTO

Durante o período em que o transformador se encontra em serviço, os isolamentos sólidos e líquidos passam por processo de envelhecimento devido a água e o calor. A deterioração das isolações sólida e líquida se realiza em presença de

catalisadores (ferro, cobre, água, etc.). Os produtos da deterioração da isolação podem também agir como catalisadores e aceleradores do processo. Esse processo viabiliza o surgimento de condições propícias a formação de descargas parciais que levam a ionização, condução e formação de corona, até que haja falha no isolamento.

Torna-se, importante e necessário o acompanhamento do envelhecimento da isolação do transformador. Para isso, o engenheiro responsável deve realizar testes e ensaios periódicos, para analisar as condições de deterioração da isolação, constatar falhas incipientes e tomar medidas para evitar o envelhecimento prematuro e a progressão da falha incipiente, resultando na destruição do transformador.

São recomendados, para o acompanhamento das condições de isolação do transformador, os seguintes testes a serem realizados no óleo isolante:

- **Exame visual e Cor:** tem por finalidade verificar a cor do óleo e a existência de partículas sólidas e gotículas de água em emulsão;
- **Densidade:**
- **Rigidez dielétrica:**
- **Sedimento e borra solúvel:** tem como objetivo determinar a presença de sedimentos ou borra solúvel no óleo;
- **Fator de potência:** É igual ao cosseno do ângulo de fase ou o seno do ângulo de perdas do material. O fator de potência aumenta de valor na medida em que a deterioração do óleo progride. Ele nos dá uma ideia da intensidade da corrente que flui pelo óleo. Um alto fator de potência é um indicativo de contaminação e de deterioração.
- **Número de Neutralização:** indica o grau de acidez do óleo. Quanto mais baixo for este grau, menor será a condução elétrica e a corrosão metálica, e mais longa a vida útil da isolação;
- **Tensão Interfacial:**
- **Umidade:** um teor de umidade igual ou superior a 50ppm no óleo, do topo do transformador, é considerado crítico e indica a necessidade de utilização de procedimentos para reduzir a umidade;
- **Análise Cromatográfica dos Gases:** é a identificação e quantificação dos gases existentes no óleo.

Com exceção da análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo, os demais ensaios podem ser realizados em campo.

Nos anexos, se encontra a tabela de especificações da resolução ANP Nº 36, de 5.12.2008 da Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis. Essa resolução estabelece as especificações dos óleos minerais isolantes tipo A e tipo B, de origem nacional ou importada, comercializados em todo o território nacional de acordo com cada norma específica.

3.2 FORMAÇÃO E EXTINÇÃO DO ARCO ELÉTRICO

3.2.1 NO ÓLEO MINERAL ISOLANTE

Durante o processo de abertura do disjuntor a óleo, o contato móvel se desloca e há a diminuição progressiva da superfície de contato entre os contatos fixo e móvel. Como consequência haverá um aumento da densidade de corrente nas extremidades dos contatos. O aumento da temperatura local acarreta também, o sobreaquecimento do óleo na adjacência dos contatos, favorecendo a formação de gases, liberação de elétrons e formação de íons (plasma). O óleo isolante tende a ocupar o espaço entre os contatos, no instante da sua separação. Devido à elevada temperatura, o óleo se vaporiza e se decompõe, havendo formação de plasma. Os elétrons livres colidirão com moléculas de óleo provocando o aparecimento de mais íons e a liberação de mais elétrons. Os elétrons se movimentam devido à ação do campo elétrico existente e o seu fluxo constitui a chamada corrente do arco. Como a tensão entre os contatos é oscilatória, nas partes ascendentes (positiva ou negativa) o campo elétrico é crescente e os elétrons são acelerados. Nas partes descendentes, o campo elétrico é paulatinamente reduzido e os elétrons são desacelerados. A recombinação de elétrons com os íons livres do arco aumenta substancialmente. Assim, a passagem da corrente pelo zero é o ponto ideal para a extinção do arco elétrico. Vários mecanismos são utilizados para assegurar a extinção do arco elétrico nos disjuntores. Entre esses mecanismos pode-se citar:

- O prolongamento e o resfriamento do arco;
- A alta velocidade da manobra (separação entre os contatos fixo e móvel);

- Fracionamento do arco e sopro magnético;
- Colocação de várias câmaras de extinção.

3.2.2 NO AR

O ar, como isolante, é amplamente usado entre todos os condutores sem isolamento sólido ou líquido, como, por exemplo, nas redes elétricas de transmissão e de distribuição, onde os condutores são fixados a certa altura através de cruzetas, ou de mísulas, os quais, fixos a postes ou torres, são equipados com isoladores (porcelana, vidro ou polímeros). Entre os condutores nus, o isolamento é somente o ar, de tal modo que o afastamento entre os fios ou cabos é, entre outros fatores, consequência da rigidez dielétrica do ar.

Entretanto, quando o ar é utilizado como meio isolante em chaves seccionadoras, um arco elétrico ocorre tanto no fechamento quanto na abertura dos contatos. Os seccionadores são utilizados em subestações para permitir as manobras de circuitos elétricos, sem carga, isolando disjuntores, transformadores de medição, proteção e barramento. Também são utilizados em redes aéreas de distribuição urbana e rural com a finalidade de seccionar os alimentadores durante os trabalhos de manutenção ou realizar manobras diversas previstas pela operação.

A operação dos seccionadores com o circuito em carga provoca desgaste nos contatos e põe em risco a vida do operador. Porém, podem ser operados quando são previstas, no circuito, pequenas correntes de magnetização de transformadores de potência e reatores, ou ainda correntes capacitivas.

4 MEDIDOR DE RIGIDEZ DIELÉTRICA

Equipamentos desse tipo são comumente utilizados em laboratório para ensaios de pureza do óleo, qualidade e composição química. Na figura 1 pode ser visualizado uma imagem detalhada das principais partes do Medido de rigidez dielétrica.

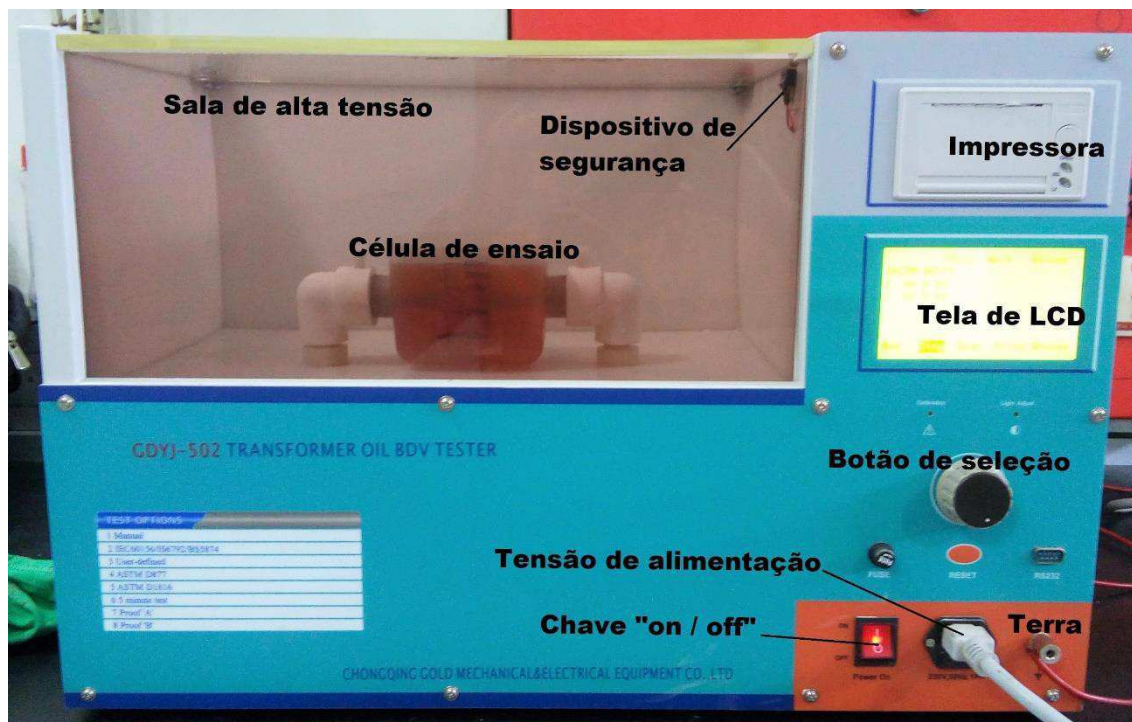


Figura 1 - Ilustração do medidor de rigidez dielétrica.

Detalhes de sua utilização como, temperatura do ambiente, umidade, tensão de alimentação, padrões do instrumento e inspeção dos resultados através da exatidão das leituras, devem estar de acordo com o especificado pelo fabricante.

O equipamento apresenta algumas características específicas para seu funcionamento. A tensão de alimentação suportável na entrada do instrumento deve ser AC 220V \pm 10%, proporcionando uma tensão de saída AC variável de 0 V até 100 kV que é aplicada sobre o isolante líquido através dos eletrodos. A taxa de aumento da tensão aplicada sobre o óleo pode variar de 0.5 kV/s \pm 5%, 2 kV/s \pm 5%, 3 kV/s \pm 5% ou 5k V/s \pm 5%. O erro de medição em leituras pode ser tolerável em até no máximo 3% para um intervalo de 10 kV até 100 kV. O equipamento pesa em torno de 41 kg e suas dimensões são de 630 mm*400 mm*3000 mm.

Na parte inferior do lado esquerdo, se encontra uma lista com as principais funções de teste do instrumento. Na lateral esquerda ao topo, fica a sala de alta tensão, onde estão localizados os eletrodos e a cuba onde é depositado o óleo mineral isolante. A porta da sala de alta tensão tem como principal função o isolamento, esta deve estar sempre fechada quando o teste estiver em andamento, caso a porta seja aberta durante o ensaio, o sensor será ativado e automaticamente interrompido o fornecimento de tensão para o transformador. A tela de LCD serve como interface digital do equipamento, os parâmetros e resultados dos testes são mostrados nessa tela. A micro impressora pode ser usada para a impressão dos resultados ou pode salvá-los na memória do equipamento. O botão de seleção é utilizado para selecionar as opções que aparecem na interface de LCD do equipamento. A botão possui três movimentos básicos para interagir com a interface, virar à direita e virar à esquerda são teclas de seleção do menu e apertando-a funciona como tecla de seleção ou ok.

Na parte inferior a direita se encontra a entrada da tensão que alimenta o equipamento, a conexão de aterramento e uma chave “on/off”.

5 ROTEIRO EXPERIMENTAL

5.1 RESUMO DO ENSAIO

A rigidez dielétrica de um líquido isolante é importante para medir sua capacidade de resistir sem falhas aos esforços elétricos. Ela indica a presença de agentes contaminantes tais como água, detritos ou partículas condutoras no líquido que podem estar presentes quando são encontrados valores baixos de rigidez dielétrica.

Dois eletrodos imersos em óleo são submetidos a uma diferença de potencial. O teste definirá qual a tensão máxima por unidade de comprimento (separação entre eletrodos) suportável pelo óleo. O resultado obtido é comparado com valores tabelados por normas para se verificar se o óleo servirá para uso em transformadores.

Os valores tabelados a seguir são válidos para temperaturas do óleo situadas entre 20 e 30 °C. A tabela foi elaborada para óleos minerais. Vale salientar que a classificação do óleo com a rigidez dielétrica, pode variar a critério da concessionária de energia. Os valores constantes desta tabela são referidos a uma distância de 2,54 mm ou

0,1 pol. entre os eletrodos. Assim, um valor de 30 kV deve, na verdade, ser interpretado como 30 kV/0,1 pol. Em termos práticos, entretanto, como a distância é padronizada, utiliza-se mais comumente apenas o valor da tensão, ou seja, 30 kV para o caso considerado.

A rigidez dielétrica de líquidos pode ser substancialmente alterada pela migração de impurezas. Para que se obtenha amostras representativas para o ensaio, é desaconselhável a agitação vigorosa porque introduz quantidade excessiva de ar na amostra.

Os materiais isolantes a serem usados serão o óleo impuro e o óleo tratado. Cada um dos materiais isolantes será ensaiado com quatro configurações de eletrodos. Serão realizadas seis medições, sendo seus valores anotados nas tabelas em anexo.

Tabela 1- Valores da rigidez dielétrica e estado do óleo isolante.

Acima de 35 kV	Excelente
De 30 a 35 kV	Muito Bom
De 25 a 30 kV	Bom
De 20 a 25 kV	Satisfatório
De 15 a 20 kV	Duvidoso (recomenda-se filtração)
Abaixo de 15 kV	Rejeitável (indispensável urgente filtração)

5.2 PREPARAÇÃO DA APARELHAGEM

5.2.1 AJUSTE E CUIDADOS COM ELETRODOS E CUBAS

- Afastamento dos eletrodos - Deverá ser de 2,54 mm (0,1 polegada) durante os ensaios. O afastamento dos eletrodos deverá ser aferido com um calibre cilíndrico tendo um diâmetro de $2,540 \pm 0,013$ mm ($0,100 \pm 0,0005$ polegadas) ou com calibres de lâminas de aço, passa ou não passa, tendo espessuras de 2,527 mm (0,0995 polegada) e 2,553 mm (0,1005 polegada) respectivamente. O afastamento deverá ser aferido após qualquer operação de polimento, secagem ou limpeza em que a cuba é desmontada ou os eletrodos são movimentados e ao início de cada dia de trabalho.

- Limpeza - A limpeza dos eletrodos e da cuba deverá ser feita com papel-tecido absorvente ou camurça, limpos e secos. Uma vez limpos, é importante não tocar nos eletrodos ou calibres. Não deverá ser usado um solvente de baixo ponto de ebulição pois sua rápida evaporação poderá esfriar a cuba causando condensação da umidade. Caso isto ocorra, a cuba deverá ser ligeiramente aquecida antes do uso, para evaporar a umidade. Após a limpeza completa, a cuba deverá ser lavada com um líquido novo, seco (sem umidade) e filtrado, do tipo que está sendo ensaiado (preferivelmente óleo desgaseificado, se a cuba está sendo usada para ensaiar óleo).
- Encha a cuba vagorosamente com o líquido a ser ensaiado de modo a evitar a oclusão do ar (formação de bolhas), até uma altura que cubra os eletrodos e evite descargas superficiais. Dê uma movimentação branda no óleo da cuba, para facilitar a saída das bolhas de ar. Para que o ar ocluído possa escapar, ponha a cuba no medidor de rigidez dielétrica e deixe o líquido repousar por 3 minutos antes da aplicação da tensão. Deve-se salientar que não se deve tocar na bancada, a fim de não agitar o óleo.

5.3 TEMPERATURA DO ENSAIO

A temperatura da amostra a ser ensaiada deverá ser a mesma do ambiente, que não poderá ser inferior a 20°C. Não ensaie líquidos a temperaturas inferiores à do ambiente pois os resultados serão variáveis e imprecisos.

5.4 APLICAÇÃO DA TENSÃO

A aplicação da tensão é feita com o Medidor de rigidez dielétrica. A tensão aplicada varia de acordo com o tipo de teste escolhido no menu de testes do equipamento.

Após o ajuste dos eletrodos e o enchimento da célula de ensaio, o Medidor pode ser ligado usando a chave “on/off”. Na tela de LCD aparecerá o menu principal do equipamento, conforme a figura 2.

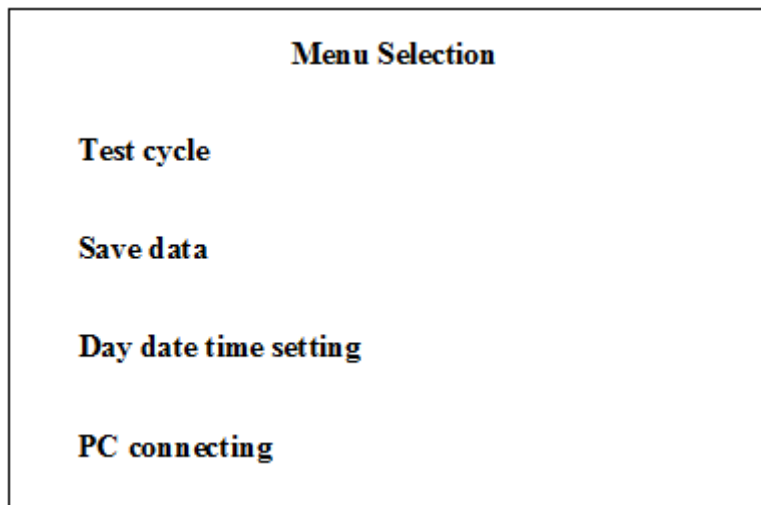


Figura 2 - Menu principal.

Dentre as opções desse menu, o equipamento possibilita acessar dados salvos de outros ensaios em “Save data”, configurar data e hora em “Day date time stting” e conectar o instrumento a um computador com a opção “PC connecting”.

Para realização do ensaio será selecionado a opção “Test cycle”, onde será direcionado para o menu de testes, que apresenta alguns ensaios referenciados pelas normas, como pode ser visto na figura 3.

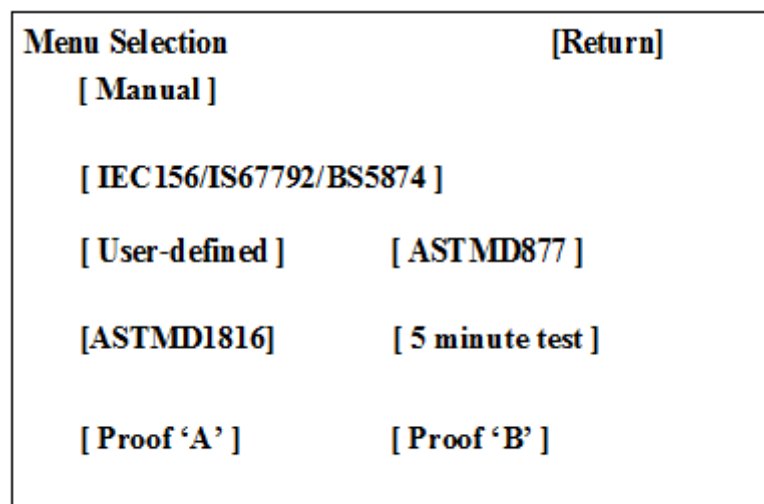


Figura 3 - Menu de testes.

O teste “[IEC156/IS67792/BS5874]” será utilizado neste experimento, referente a Norma IEC 156. A configuração dos eletrodos na célula de ensaio é no formato

esférico. Nesse teste selecionado, o óleo deve repousar por 5 minutos antes da aplicação da tensão, já na célula de ensaio na sala de alta tensão.

A tensão é aplicada a partir de zero à razão de $2\text{k v/s} \pm 5\%$ até que ocorra a descarga no espaço (gap) entre eletrodos. Serão realizadas seis medições durante o ensaio em um único enchimento da célula. O intervalo entre uma e outra medição tem duração de dois minutos. Registre os valores da tensão disruptiva nas tabelas em anexo. Faça a média aritmética de todos os valores encontrados, obtendo assim a rigidez dielétrica do óleo.

Para avaliar as medidas obtidas, se torna necessário fazer uma verificação de natureza estatística, o próprio equipamento faz essa avaliação fornecendo o cálculo da razão entre o desvio padrão e a média. O critério seguido para avaliar essas medidas é dado pela razão entre o desvio padrão e a média dos 6 valores individuais. Se essa relação for maior do que 0,1 é provável que o desvio padrão das seis medidas seja excessivo e portanto, o erro provável da média também o seja. Anote os valores do desvio padrão nas tabelas em anexo e calcule o critério que avalia as medidas.

O tempo de repouso e a razão da tensão aplicada pode variar de acordo com o tipo de teste que foi escolhido para o ensaio com o óleo isolante.

5.5 ROTEIRO

- a) Verifique a temperatura do ambiente com um termômetro.
- b) Retire a amostra de óleo mineral da estufa.
- c) Deixe-a resfriar até atingir aproximadamente a temperatura do ambiente.
- d) Coloque a amostra na cuba, tomando o cuidado para que não haja a formação de bolhas.
- e) Insira a cuba na sala de alta tensão, verificando a fixação do encaixe. Feche a tampa.
- f) Prepare o equipamento, lembre-se de verificar se o mesmo está **aterrado**.
- g) Ligue o equipamento no botão “on/off” e selecione a opção “test cycle” utilizando o botão de seleção.

- h) Selecione o teste “[IEC156/IS67792/BS5874]” girando o botão para direita ou esquerda, em seguida aperte o botão para que o teste seja selecionado.
- i) Aparecerá na tela as configurações do ensaio, certifique-se e selecione a opção “run” para que se inicie o ensaio.
- j) Aguarde a inicialização do ensaio.
- k) A cada medida da tensão de ruptura, observe a descarga elétrica entre os eletrodos e anote os valores nas tabelas 1 e 2.
- l) Calcule a média das seis medições, anotando nas tabelas 1 e 2.
- m) Anote os valores do desvio padrão informados ao final do teste, nas tabelas 1 e 2.
- n) Calcule a razão entre o desvio padrão e a média, anotando nas tabelas em anexo. Avalie estatisticamente as medidas.
- o) Ao fim de cada ensaio, desligue a chave “on/off” para que possa ser aberta a tampa da sala de alta tensão e retirada a cuba.
- p) Repita os mesmos procedimentos anteriores para as 4 configurações de eletrodos.
- q) Compare os valores de rigidez para o óleo impuro e tratado. Avalie o estado das amostras.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOGORODITSKY, N. P., PASINKOV, N. N., TAREEV, B. M. - *Electrical Engineering Materials*, São Paulo, Mir Publishers, Moscou, 1979.

OLIVEIRA, J. C.; COGO, J. R. e ABREU, J. P. G. - *Transformadores: Teoria e Ensaio*, São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1984.

MILASCH, M. - *Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante*, São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1984.

MILASCH, M. - *Manutenção de Disjuntores de Alta Tensão*, Rio de Janeiro, Cervantes Ed., 1993.

MAMEDE FILHO, João - *Manual de Equipamentos Elétricos*, Volume I, Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Ed., 1993.

ABNT - NBR - 6869 – *Líquidos isolantes elétricos - Determinação da Rigidez Dielétrica (eletrodos de disco)*, 1989.

ASTM - D877 - *Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes*, 2007.

CIE - IEC - 156 - *Insulating liquid - Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method*, 1995.

ANP. Resolução n. 36, de 5 de Dezembro de 2008. *Dispõe sobre as especificações dos óleos minerais isolantes, comercializados em todo território nacional.*

INSTRUCTION MANUAL – *Insulating oil tester instruction manual V1.2.2.*

7 ANEXOS

Tabela 1: Óleo impuro.

Leitura	Configuração dos Eletrodos			
	Meia – esfera X Meia - esfera	Plano X Plano	Plano X Ponta	Ponta X Ponta
1°				
2°				
3°				
4°				
5°				
6°				
Média (s)				
Desvio padrão (\bar{x})				
\bar{x}/s				

Tabela 2: Óleo tratado.

Leitura	Configuração dos Eletrodos			
	Meia – esfera X Meia - esfera	Plano X Plano	Plano X Ponta	Ponta X Ponta
1°				
2°				
3°				
4°				
5°				
6°				
Média (s)				
Desvio padrão (\bar{x})				
\bar{x}/s				

Óleos Minerais Isolantes, Tipo A e Tipo B devem atender na íntegra aos requisitos estabelecidos na Tabela de Especificações da ANP.

Tabela 3: Tabela de especificações.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	LIMITES		MÉTODO ABNT NBR e NBR/IEC	MÉTODO ASTM e IEC
		Tipo A	Tipo B		
Aspecto		Claro, límpido e isento impureza		Visual	
Cor ASTM, máx,		1,0		14483	ASTM D1500
Massa específica a 20°C	kg/m ³	861,0-900,0	860,0 máx.	7148	ASTM D1298
Ponto de fluidez, máx.(1)	°C	-39	-12	11349	ASTM D97 ou ASTM D5950
Viscosidade cinemática, máx. (2)	mm ² /s (cSt)			10441	ASTM D 445
a 20°C		25,0			
a 40°C		12,0			
a 100°C		3,0			
Ponto de fulgor, mín.	°C	140		11341	ASTM D92
Índice de neutralização, (IAT), máx.	mg KOH/g	0,03		14248	ASTM D974
Água, máx (3)	mg/kg	35		10710 B	ASTM D1533
Rigidez dielétrica	kV				
Eletrodo de disco, mín., ou		30		6869	ASTM D 877
Eletrodo de calota, min		42		NBR/IEC 601560	
Tensão interfacial a 25 °C, mín.	mN/m	40		6234	ASTM D 971

Fonte: Adaptado de ANP N° 36; (2008).