

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS UNIS
ENGENHARIA MECÂNICA
GUILHERME HENRIQUE BERTOLDO

N. CLASS.....
CUTTER.....
ANO/EDIÇÃO.....

ENSAIO DE RIGIDEZ DIELETRICA EM ÓLEO MINERAL ISOLANTE SOB
VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Varginha

2013

FEPESMIG

GUILHERME HENRIQUE BERTOLDO

**ENSAIO DE RIGIDEZ DIELÉTRICA EM ÓLEO MINERAL ISOLANTE SOB
VARIAÇÃO DE TEMPERATURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS/MG, como requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do Prof. Me. Luiz Carlos Vieira Guedes.

Varginha

2013

GUILHERME HENRIQUE BERTOLDO

**ENSAIO DE RIGIDEZ DIELÉTRICA EM ÓLEO MINERAL ISOLANTE SOB
VARIAÇÃO DE TEMPERATURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros.

Aprovado em / /

Prof. Me. Luiz Carlos Vieira Guedes

Prof.

Prof.

O.B.S.:

Dedico este trabalho a Deus, que me iluminou e manteve minha mente sã, durante este lapso intrincado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus professores e colegas de trabalho que contribuíram de alguma forma para que pudesse chegar até aqui. Agradeço em especial, meus pais e minha noiva Andréa, pela condescendência nos momentos de ausência.

"O que sabemos é uma gota e o que ignoramos
é um oceano".

Isaac Newton

RESUMO

Atualmente o modo conhecido para se regular níveis de capacitância e de tensão de um capacitor de média tensão é o método de chaveamento, método que nada mais é que a retirada ou colocação em serviço de um banco de capacitores, sendo que tais acionamentos possam ser executados de diversas maneiras dentre as quais manuais ou automáticas. A operação destes equipamentos possui custo elevado, é onerosa pelo fato de que o dispositivo responsável pela manobra de abertura ou fechamento (liga ou desliga) é complexo. No entanto, ao investigar a fundo as variáveis que contribuem com o valor específico de capacitância de um sistema que apresente características de um capacitor, é nítida a possibilidade de manipular tais variáveis e chegar a um resultado satisfatório, não levando em consideração em um primeiro instante o seu grau de dificuldade. A capacitância depende de três variáveis básicas que são: a área das suas armaduras, a distância entre estas armaduras e tipo de material dielétrico usado (constante dielétrica), isto para sistemas singelos, não considerando sistemas especiais e singulares que possam vir a existirem. Um capacitor convencional comercializado possui como material dielétrico o óleo mineral isolante que garante certas características e parâmetros que são adequados ao nível tensão de operação. Entretanto se, for possível alterar as propriedades físicas deste material por meio da variação de temperatura, é de se esperar que o seu valor de constante dielétrica altere (nível de desordem atômica), função desta situação imposta; e conseqüentemente altere o seu valor de capacitância nominal, garantindo ao equipamento, características de se tornar variável em função da variação das propriedades físicas óleo mineral isolante. Por fim, se o *gap* de variação da rigidez dielétrica específica do óleo mineral isolante apresentar valores consideráveis, sob a ação dos diferentes gradientes de temperatura impostos no ensaio, pode-se construir um equipamento que trabalhe o tempo todo conectado ao sistema, dispensando o uso de dispositivos de manobras. A regulação do nível de capacitância ficará a cargo da temperatura de trabalho do fluido, que por sua vez será controlada de acordo com a necessidade o SEP (Sistema Elétrico de Potência).

Palavras Chave: Capacitor. Rigidez dielétrica. Óleo mineral isolante.

ABSTRACT

Currently known way to regulate levels of voltage and capacitance of a capacitor is the medium voltage switching method, a method which is nothing but withdrawing or putting into service of a capacitor bank, and these drives can be run in several ways among which automatic or manual. The operation of such equipment has high cost, it is costly for the fact that the device responsible for closing or opening operation (on or off) is complex. However, to fully investigate the variables that contribute to the value of specific capacitance of a system that has characteristics of a capacitor, there is a clear possibility of manipulating these variables and come up with a satisfactory result, not taking into consideration in the first instance their degree of difficulty. The capacitance depends on three basic variables which are: the area of their armor, the distance between the armor and type of dielectric material used (dielectric constant), systems for simple ones, excluding special and unique systems that may exist. Conventional commercialized has a capacitor dielectric material as the insulating oil which guarantees certain characteristics and parameters that are appropriate to the operating voltage. However if you can alter the physical properties of this material by temperature change, it is expected that the value of dielectric constant change (level of atomic disorder), according to this situation imposed, and consequently change its capacitance value rated, ensuring the equipment features become variable due to the variation of physical properties mineral oil isolante. Finally, if the gap variation of the dielectric strength of insulating oil specifies provide considerable amounts, under the action of different temperature gradients imposed in the assay can build a device that works all the time connected to the system, eliminating the use of shunting devices. The regulation of capacitance level will be the responsibility of the working temperature of the fluid, which in turn is controlled according to need the SEP (Electric Power System).

Keywords: Capacitor. Dielectric strength. Insulating mineral oil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Capacitor.....	18
Figura 2 - Capacitores para aplicação em circuitos elétricos AC e DC	18
Figura 3 - Lei de variação da corrente com a tensão nos dielétricos sólidos	23
Figura 4 - Modelo hipotético.....	28
Figura 5 - Equipamentos utilizados.....	36
Figura 6 - Amostra de OMI.....	37
Figura 7 - Condições climáticas	37
Figura 8 - Cuba do TRD DPA 75C	38
Figura 9 - Ajuste do eletrodo.....	38
Figura 10 - Relatório DPA 75C.....	41

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

OMI – Óleo Mineral Isolante	12
RD – Rigidez dielétrica	12
SEP – Sistema elétrico de potencia	12
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais	12
kV – Quilo volt.....	13
mm – Milímetros.....	13
d.d.p - Diferença de potencial.....	16
mm – Milímetros.....	16
DC – Corrente Contínua.....	16
AC – Corrente Alternada.....	16
Vcc – Tensão contínua	22
I – Corrente elétrica.....	24
U – Tensão elétrica.....	24
K – Constante dielétrica	26
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.....	30
ASTM – American Society for Testing and Materials.....	30
CEM – Contra Eletro Motriz.....	31
TRD – Testador de Rigidez Dielétrica	31
HV – High Voltage	31
BHT – Inibidor de Oxidação	33
ANP – Agência Nacional do Petróleo.....	33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 ÓLEO MINERAL ISOLANTE	13
2.1 Propriedades físicas, químicas e elétricas	13
2.1.1 Propriedades físicas.....	13
2.1.2 Propriedades químicas.....	14
2.1.3 Propriedades elétricas.....	
3 RIGIDEZ DIELÉTRICA	15
3.1 Termos usuais	16
4 CAPACITOR	18
4.1 Simbologia	18
5 DIELÉTRICOS	19
5.1 Classificação dos dielétricos	19
5.2 Propriedades dielétricas	20
5.3 Dielétrico líquido	22
5.4 Comportamento dos dielétricos em serviço	22
6 CAPACITÂNCIA	24
6.1 Fatores que afetam a capacitância	24
6.2 Efeitos termodinâmicos sobre a capacitância	25
6.2.1 Polarização eletrônica e iônica.....	25
6.2.1 Polarização dipolar.....	26
6.2.3 Polarização estrutural.....	26
6.3 Efeitos termodinâmicos sobre a viscosidade	26
7 METODOLOGIA	27
7.1 Normalizações	29
7.2 Controles físicos	29
7.3 Recursos utilizados	30
7.4 Características TRD DPA 75C – Manual técnico	30
7.5 Características da amostra	32
7.6 Procedimentos ASTM D877	33
7.7 Significado e uso – Texto traduzido da norma ASTM D877	33
7.8 Escopo – Texto traduzido da norma ASTM D877	34
8 ENSAIO PRÁTICO	36
8.1 Relação de equipamentos e materiais	36
8.2 Etapas do processo de ensaio	37
9 RESULTADOS	39
9.1 Estratificações de resultados	40
9.2 Protocolos de medição como impressão	41
10 DISCULSÃO	42
11 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho em um estudo dirigido ao comportamento do óleo mineral isolante (OMI), um fluido dielétrico, sob variações de temperatura, e corroborar seu comportamento no quesito rigidez dielétrica.

A temática deste projeto direciona ao ensaio de rigidez dielétrica (RD) do óleo mineral isolante sob variação de temperatura, com o intuito de verificar o seu desempenho quando lhe for imposta mudanças bruscas de gradientes de temperatura e por conseqüência apurar seu comportamento da capacitância específica de um conjunto que apresente características típicas de um capacitor.

A finalidade de se ensaiar este fluido está relacionada ao seu comportamento como isolante dielétrico empregado em capacitores de média tensão, aplicáveis as redes de distribuição e transmissão de energia elétrica do sistema elétrico de potência (SEP).

A maneira como é realizado o controle dos níveis de capacitância é antigo, oneroso e oferece grande risco a mão de obra que opera um banco de capacitores (risco de explosão).

O custo final deste trabalho não é mensurável, pois apenas verifica o comportamento de uma amostra de óleo em função da temperatura de exposição.

Diante da nova demanda tecnológica proposta e desenvolvida aqui, o resultado final deste projeto ainda que não apresente viabilidade para a aplicação em capacitores, poderá ter os seus dados compilados e disposto para o desenvolvimento de um líquido dielétrico específico para operação em tal condição, que venha a favorecer a idéia de um capacitor variável para aplicação no SEP, contribuindo de alguma maneira com o projeto "*Cidades do Futuro - Smart Grid*", desenvolvido pela CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais).

2 ÓLEO MINERAL ISOLANTE

O óleo mineral isolante é um classificado como um fluido, que constitui uma matéria que se deforma continuamente, quando aplicado uma tensão de cisalhamento, para Tipler (1984, p. 358), os fluidos não mantêm as formas, os fluidos incluem os líquidos, que fluem até ocupar regiões mais baixas possíveis nos recipientes onde se encontram, e os gases, que se expandem para encher os recipientes, independente das respectivas formas.

“Os principais líquidos isolantes utilizados em equipamentos elétricos são: óleos minerais parafínico ou naftênico, óleo mineral de alto ponto de fulgor R-Temp, silicone e ascarel.” (LACTEC, 2013, p.2).

“De acordo com os hidrocarbonetos que os constituem, os óleos podem ser divididos em duas classes principais: parafênicos e naftalínicos [...] O petróleo atualmente usado para obtenção de óleos isolantes é a base naftalínica. Propriedades físicas: cor amarela claro, ponto de fogo 165°C, rigidez dielétrica de 90 a 100 kV/cm.” (UFMS, 2013, f.1).

O óleo mineral isolante utilizado em equipamentos elétricos é obtido através da destilação do petróleo natural, da fração de 300 a 400 °C. Este cru destilado pode ser de origem parafínica ou naftênica, dando origem ao correspondente óleo mineral isolante. O óleo mineral isolante não é um composto puro, mas sim uma mistura na qual as moléculas em sua maioria são constituídas basicamente por carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos) e, em pequenas quantidades, por compostos que apresentam nitrogênio, enxofre e oxigênio em sua estrutura (heterocompostos). Suas moléculas médias possuem de 19 a 23 átomos de carbono. (LACTEC, 2013, p.3).

2.1 Propriedades físicas, químicas e elétricas

Segundo Engeletrica (2013, p.1) o óleo mineral isolante apresenta propriedades físicas, químicas e elétricas específicas descritas a seguir.

2.1.1 Propriedades físicas

Abaixo segue descrição das propriedades físicas:

- a) Viscosidade: deve ser baixa para circular com facilidade e dissipar adequadamente o calor.
- b) Ponto de Fulgor: para a segurança dos equipamentos com relação à possibilidade de incêndio deve assegurar um ponto de fulgor mínimo adequado.
- c) Ponto de Anilina: indica o poder de solvência do óleo por matérias com as quais entrará em contato. Um baixo ponto de anilina indica maior solvência do produto.

- d) Tensão Interfacial: indica a existência de substâncias polares dissolvidas no óleo. Estas substâncias prejudicam as propriedades dielétricas do óleo, além de contribuírem para o seu envelhecimento. Um alto valor é desejável.
- e) Cor: o óleo isolante novo costuma ser claro. O escurecimento em serviço indica sua deterioração.
- f) Ponto de Fluidiez: sendo a temperatura abaixo da qual o óleo deixa de escoar, esta característica deve ser compatível com a mínima temperatura em que o óleo vai ser utilizado. O ensaio também ajuda na identificação do tipo de óleo: parafínico ou naftênico.
- g) Densidade: influi na capacidade de transmissão de calor do óleo. Nos óleos isolantes encontra-se entre 0,850 e 0,900, estando mais próxima de um dos dois valores segundo sua predominante composição em hidrocarbonetos (parafínicos ou naftênicos).

2.1.2 Propriedades químicas

Abaixo segue descrição das propriedades químicas:

- a) Estabilidade à oxidação: é importante para o bom desempenho do óleo e durabilidade do sistema isolante. A oxidação é decorrente da estocagem do óleo e das próprias condições de operação dos equipamentos elétricos e se manifesta através de borra e de acidez do óleo.
- b) Acidez e água: devem ser extremamente baixos para evitar a passagem de corrente elétrica, reduzir a corrosão e aumentar a vida de todo o sistema.

2.1.3 Propriedades elétricas

Abaixo segue descrição das propriedades elétricas:

- a) Rigidez dielétrica: é a capacidade do óleo de resistir à passagem da corrente elétrica. Quanto mais puro estiver o óleo, maior a rigidez dielétrica. Umidade, partículas sólidas e gases dissolvidos prejudicam a capacidade isolante do óleo. A rigidez dielétrica é fortemente afetada quando o óleo possui íons e partículas sólidas higroscópicas. Neste caso é preciso tratar o óleo com aquecimento e filtragem.
- b) Fator de potência: é uma indicação das perdas dielétricas no óleo. O óleo será melhor, quanto menores forem estas perdas. A condução de corrente nos óleos pode ser causada por elétrons livres resultantes da ação do campo eletromagnético sobre as moléculas ou por partículas carregadas. O fator de potência mede a contaminação do óleo por água e contaminantes sólidos ou solúveis.

3 RIGIDEZ DIELÉTRICA

De acordo com a UFMS (2013, p.21),

Rigidez dielétrica é o gradiente de potencial, isto é, o quociente (V/e) no momento da ruptura e se avalia em (kV/cm) ou (kV/mm) [...]. Quando temos dois condutores separados por um isolante, ao aumentarmos progressivamente a diferença de potencial entre esses condutores, o dielétrico deixa bruscamente de funcionar como isolante, sendo atravessado por uma corrente elétrica. O valor da diferença de potencial correspondente, referida à unidade de espessura do dielétrico (kV/mm) é a resistência dielétrica ou rigidez dielétrica [...]. O valor da rigidez dielétrica de certa substância isolante depende de vários fatores entre os quais temos: Classe de voltagem (DC ou AC), frequência; duração de aplicação da d.d.p; rapidez do crescimento da d.d.p; forma dos corpos de prova; espessura do dielétrico; temperatura; tensão desruptura- breack-downm [...]. Os materiais classificados como dielétricos não são isolantes perfeitos, ao contrário pode-se constatar que ainda apresenta uma reduzida condutividade a qual, entretanto, é tão pequena que pode ser geralmente desprezada, quando o material é usado dentro dos limites especificados pela sua rigidez dielétrica.

“A rigidez dielétrica, expressa em kV, mede a capacidade de um líquido isolante resistir ao impacto elétrico sem falhar.” (LACTEC, 2013, p. 14).

Quando se trata de campos eletrostáticos, o meio no qual os mesmos existem deverá ter resistividade muito alta, ou seja, deverá opor-se tanto quanto possível, à passagem de corrente elétrica de condução, motivo pelo qual recebe o nome de dielétrico. O material que o constitui é designado por isolante. (UFSC, 2013, f.1).

Para UFSC (2013, f.1) esta grandeza está longe de ser constante para cada material, pois depende de muitos fatores, tais como a espessura do isolante, as dimensões e forma dos eletrodos utilizados para a aplicação da tensão, a frequência da tensão aplicada, o número de aplicações de tensão na unidade do tempo (fadiga do material), a temperatura, grau de umidade, etc.

Como é difícil conhecer o valor do campo no momento da ruptura, visto ele não ser normalmente uniforme, é costume definir-se a rigidez dielétrica (RD) simplesmente pelo quociente da tensão aplicada no momento da ruptura pela espessura do isolamento e como a RD varia com a espessura do isolante é costume indicar esta ao referir aquela. Por exemplo para a mica a RD varia de 600 a 750 kV/cm, medida para espessura de 1mm.

3.1 Termos usuais

A seguir algumas nomenclaturas relacionadas ao ensaio de rigidez dielétrica, de acordo com UFSC (2013, f.1):

- a) Rigidez dielétrica superficial: No caso dos isolantes sólidos pode acontecer que o arco disruptivo, em vez de atravessar a sua massa, salte pela sua superfície. Ao quociente da tensão pela distância entre os condutores é dado o nome de rigidez dielétrica superficial. Esta depende, evidentemente, da forma do isolante e do estado da sua superfície.
- b) Perdas nos dielétricos: Nos dielétricos sujeitos a uma tensão contínua verifica-se uma perda por efeito Joule tal como nos condutores. A corrente de perdas, se bem que muito limitada, dá lugar a certo aquecimento. Estas perdas não têm importância a não ser quando dão lugar a um aquecimento permitindo, por consequência, maior corrente e maiores perdas. Nos dielétricos sujeitos a uma tensão alternada dá-se, da mesma forma, a perda por efeito Joule, mas surge outro fenómeno que origina perdas e que tem o nome de histerese dielétrica. A energia perdida é também transformada em calor. O nome deste fenómeno é dado pela analogia existente com a histerese magnética. A explicação física das perdas por histerese dielétrica é dada por consideração da falta de homogeneidade do dielétrico.
- c) Ângulo e fator de perdas: Quando um dielétrico está sujeito a um campo elétrico alternado, a corrente que o atravessa deveria estar avançada de “ $\pi/2$ ” em relação à tensão, mas pelo fato de existir uma queda ôhmica através da massa do isolante, haverá uma componente da corrente que fica em fase com a tensão e o ângulo de diferença de fase será $(\pi/2 - \delta)$, sendo “ δ ” chamado ângulo de perdas. Este valor pode ir de poucos minutos, se o dielétrico for bom, até a alguns graus, se for de má qualidade. À “ $\text{tg } \delta$ ”, que pode tomar igual ao ângulo expresso em radianos (por se tratar de ângulos muito pequenos) é dado o nome de fator de perdas. A potência perdida no dielétrico será dada por:

$$P = U.I.\cos (\pi /2 - \delta) = U.I.\text{sen } \delta = U.I.\delta \quad (\text{I})$$

Onde:

P – Potência perdida no dielétrico;

U – Tensão elétrica aplicada;

I – Corrente elétrica;

π – Constante (3,1416);

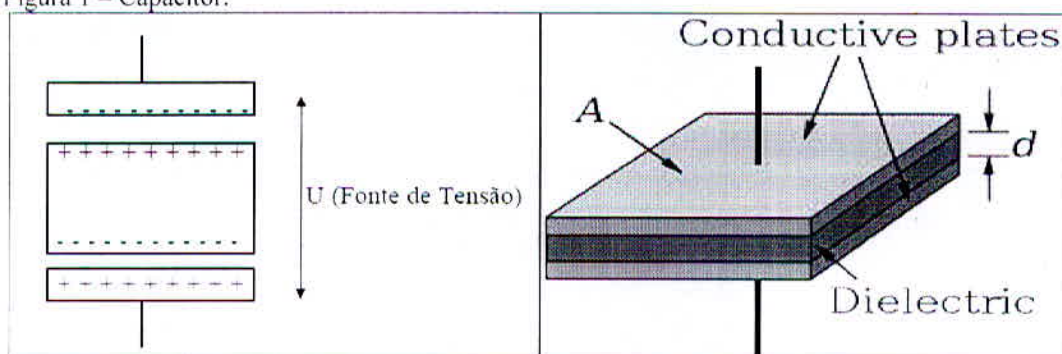
δ – Ângulo de perdas.

d) Ruptura dos Dielétricos - Quando o campo elétrico a que um dado dielétrico está sujeito ultrapassa um determinado valor se dá a ruptura do dielétrico. A maneira como esta se produz e as suas conseqüências são, porém, diferentes conforme o tipo de dielétrico. Assim, é compreensível que, se a ruptura se produzir num dielétrico fluido, a matéria atingida pela descarga é logo substituída por outra e, se o fenômeno não repetir, a sua única conseqüência é o aparecimento de partículas carbonizadas no seio do fluido. No caso dos dielétricos sólidos já assim não acontece, pois a descarga implica a sua destruição no ponto em que a ruptura se verifica.

4 CAPACITOR

“Todo dielétrico inserido em um circuito elétrico pode ser considerado como um capacitor de capacidade determinada.” (UFSC, 2013, f.1).

Figura 1 – Capacitor.



Fonte: UFSC (2013, f.1).

Fonte: LEARNABOUT ELECTRONICS (2013, f.1).

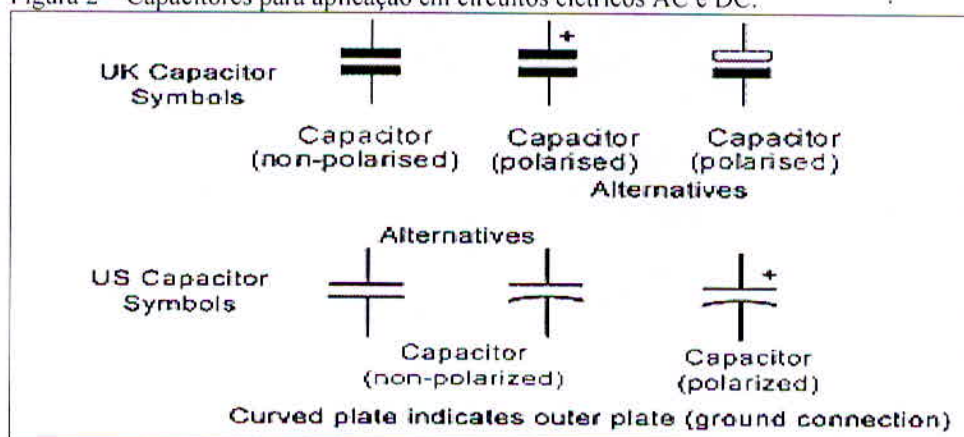
“Um capacitor típico é formado por dois condutores planos paralelos separados por uma distância (d), com o espaço entre eles ocupado por um dielétrico.” (ALONSO; FINN, 1972, p.145).

“No equilíbrio, os dois condutores possuem cargas de mesmo módulo, mas de sinais contrários, e a carga líquida do capacitor como um todo permanece igual a zero.” (YOUNG; FREEDMAN, 2009, p.156).

4.1 Simbologia

A figura a baixo descreve as simbologias usuais aplicadas a capacitores.

Figura 2 – Capacitores para aplicação em circuitos elétricos AC e DC.



Fonte: LEARNABOUT ELECTRONICS (2013, f.1).

5 DIELÉTRICOS

O papel dos dielétricos na eletrotécnica é muito importante e tem dois aspectos, realizam o isolamento entre os condutores, entre estes e a massa ou a terra, ou, ainda, entre eles e qualquer outra massa metálica existente na sua vizinhança e modificam, em proporções importantes, o valor do campo elétrico existente em determinado local.

De acordo com LACEF (2006, p.19), os materiais dielétricos são caracterizados pela habilidade de armazenar carga elétrica (elevada capacitância) e suas respostas inertes em relação ao campo elétrico, isto é, variação da capacitância, características de perda, resistência de isolamento, força dielétrica, taxa de envelhecimento e dependências de temperatura em relação as propriedades mencionadas.

“Um isolante pode carregar qualquer distribuição de cargas elétricas na sua superfície e no seu interior, e (em contraste com o condutor) o campo elétrico no interior de um isolante pode ter valores não nulos.” (HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2004, p.105).

5.1 Classificação dos dielétricos

Conforme UFMS (2013, p.28), os materiais dielétricos podem ser classificados em sólidos (polímeros, material orgânico – cortiça couro e madeira), líquido e gases dielétricos. Também podem ser classificados em orgânicos ou inorgânicos, naturais ou sintéticos e de origem vegetal, mineral ou animal.

Para UFSC (2013, f.1), as particularidades da polarização permitem dividir todos os dielétricos em vários grupos. Ao primeiro grupo podem pertencer os dielétricos que possuem somente a polarização eletrônica, por exemplo, as substâncias sólidas não polares ou debilmente polares em estado cristalino ou amorfo (parafina, enxofre, poliestireno), assim como os líquidos e gases não polares ou debilmente polares (benzeno, hidrogênio e outros).

Ao segundo grupo pertencem os dielétricos que possuem ao mesmo tempo polarização eletrônica e dipolar. São estas as substâncias polares (dipolares) orgânicas, semi-líquidas e sólidas (algumas resinas, celulose, alguns hidrocarbonetos cloretados, etc.).

Ao terceiro grupo pertencem os dielétricos inorgânicos sólidos com polarização eletrônica, iônica e ion-eletrônica dipolar. Este grupo pode ser dividido no subgrupo:

a) Com polarização eletrônica e iônica: Ao qual pertencem principalmente as substâncias cristalinas com empacotamento denso de íons (quartzo, mica, sal e óxido de alumínio).

b) Com polarização eletrônica, iônica de dipolar: Ao qual pertencem os materiais que contêm fase vítrea (porcelana) e os dielétricos cristalinos com empacotamento não denso.

A um quarto grupo pertencem os componentes ferroelétricos, que se caracterizam por ter polarização espontânea (nos campos elétricos alternados, os materiais com polarização espontânea se caracterizam por uma considerável dissipação de energia), eletrônica e iônica combinadas. Seriam estes materiais o “Sal de Seignette” e o de “Rochelle”, “Titanato de Bário” e outros.

Esta classificação dos dielétricos permite que suas propriedades elétricas sejam até certo ponto pré-determinadas.

Tabela 1 - Materiais e seus respectivos valores de RD

Material	Rigidez Dielétrica (kV/mm)
Óleo Mineral	10 a 14
Askarel	13 a 16
Óleo Silicone	10 a 30
Parafina	20 a 25
Goma-laca	20 a 30
PVC	40 a 50
Polietileno	30
Polestirol	25 a 30
Baquelite	20
Papel para Capacitores	35
Papel para cabos	08 a 10
Vidro e fibra de vidro	35 a 50
Amianto	02 a 30
Mica Muscovita	05 a 40
Betume	50 a 100

Fonte: UFMS (2013).

5.2 Propriedades dielétricas

Podem-se citar algumas propriedades dielétricas, tais como: resistência, intensidade dielétrica, constante dielétrica, descritas a seguir.

- a) Resistência: “A resistência é definida como a grandeza que mede a capacidade de um determinado material em resistir a passagem de corrente elétrica abaixo de um potencial limite V_{cc} .” (LACCEF, 2006, p.30).
- b) Intensidade dielétrica: “A intensidade dielétrica é a medida da capacidade do material em resistir a uma grande força do campo fora do desarranjo elétrico sendo expressa em volts por mil (0,001’) ou volts por cm do dielétrico.” (LACCEF, 2006, p.34).
- c) Constante dielétrica: A medida da habilidade do material dielétrico armazenar energia é chamada de constante dielétrica, é a facilidade com que as partículas de uma substância podem ser polarizadas (distorcidas, orientadas, ou deslocadas temporariamente) por um campo elétrico.

Conforme UFERSA (2013, p.6), um material dielétrico é caracterizado por sua constante dielétrica (ou permissividade elétrica) “ ϵ ”. Através dessa constante pode-se relacionar a densidade de fluxo elétrico e o campo elétrico no material. A constante dielétrica é normalmente apresentada de forma relativa – em relação à constante dielétrica do vácuo. Quanto maior a constante dielétrica, maior a densidade de fluxo elétrico no material para um mesmo campo aplicado. Nenhum material dielétrico é perfeito, ou seja, a partir de uma determinada intensidade de campo elétrico ocorre a ruptura do dielétrico, isto é, a formação de um canal condutivo no corpo do dielétrico. Em dielétricos na forma gasosa ou líquida normalmente não ocorre dano permanente ao material. Em dielétricos sólidos, por outro lado, ocorre uma mudança permanente – formação do canal condutor - e o dielétrico fica inutilizado.

A constante dielétrica ou permissividade relativa é a capacidade de um material se opor ao fluxo de corrente, a constante dielétrica está relacionada com a frequência de operação do circuito.

A constante dielétrica é um valor relativo baseado em 1,0 para o vácuo. Esta magnitude é razão entre a carga Q , obtida com uma determinada tensão no capacitor que contém um dado dielétrico e a carga Q_0 , que poderia obter-se com um capacitor das mesmas dimensões, com a mesma tensão, se entre os eletrodos existisse vácuo.

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = 1 + \frac{Qd}{Q_0} \quad (II)$$

De acordo com UFSC (2013, f.1), da expressão (II) se deduz que a permissividade relativa de qualquer substância dielétrica é maior que a unidade. A constante dielétrica e

também pode ser determinada pela razão entre a capacitância de um capacitor com o dado dielétrico e a capacitância de outro capacitor com as mesmas dimensões cujo dielétrico seja o vácuo.

5.3 Dielétrico líquido

De acordo com LACTEC (2013, p.1), para um líquido cumprir a função de isolamento, este deve atuar como um dielétrico ou extintor de arco entre partes de potencial elétrico diferente, para isso deve apresentar elevada rigidez dielétrica. Para cumprir a função de refrigeração, é necessário que o fluido possua viscosidade adequada, permitindo que o calor gerado pela parte ativa seja trocado com meio ambiente por convecção natural e, ainda, tenha uma alta condutividade térmica.

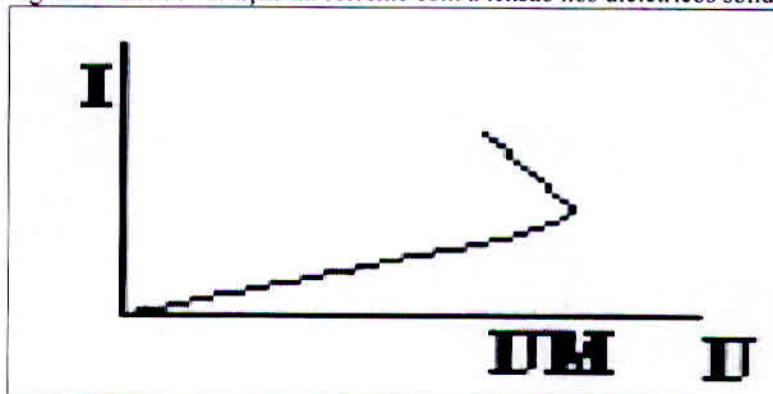
“Capacitores: recomenda-se a utilização de hidrocarbonetos aromáticos sintéticos, como o dodecilbenzeno em substituição ao ascarel.” (LACTEC, 2013, p.8).

5.4 Comportamento dos dielétricos em serviço

De acordo com UFSC (2013, f.1), uma vez que certa porção de isolamento apresenta uma dada resistência, podemos falar em resistividade do material, se bem que esta seja influenciada por uma diversidade de fatores. Por exemplo, a temperatura afeta sensivelmente o valor da resistividade e, de uma maneira geral, o aumento da temperatura provoca uma diminuição da resistividade dos materiais isolantes.

Resistência de Isolamento: O dielétrico impede a passagem da corrente elétrica enquanto o campo elétrico nele estabelecido não ultrapassar um determinado valor que depende da natureza do dielétrico e das suas condições físicas. Este impedimento, porém, não é total, pois, se uma determinada porção do isolante estiver submetida a uma tensão U , ela será atravessada por uma corrente I , sendo o quociente entre U e I designado por resistência de isolamento. A resistência de isolamento não é constante, isto é, os isolantes não obedecem de uma forma geral, à lei de Ohm. No caso do comportamento dos gases, só para valores baixos de tensão estes obedecem àquela lei. No caso dos dielétricos sólidos, a curva de variação da corrente com a tensão já tem um aspecto diferente, sendo de uma forma geral do tipo da apresentada na figura (3).

Figura 3 - Lei de variação da corrente com a tensão nos dielétricos sólidos.



Fonte: UFSC (2013).

A primeira parte da curva corresponde aproximadamente a uma proporcionalidade entre a intensidade de corrente e a tensão, a partir de um determinado valor de tensão, o crescimento de corrente acentua-se e ao atingir-se um valor U_M da tensão, a corrente cresce rapidamente mesmo que se faça descer o valor de tensão.

Esta última parte da curva corresponde à perfuração do isolamento ou, pelo menos, antecede-a de um pequeno intervalo de tempo, pois a libertação de calor engrandecida pelo aumento da corrente vai rapidamente provocar a perfuração.

6 CAPACITÂNCIA

“A capacidade elétrica de um condutor isolado é definida como a relação de sua carga para o seu potencial. [...] O conceito de capacidade elétrica pode ser estendida para um sistema de condutores.” (ALONSO; FINN, 1972, p.144).

$$C = Q/V \quad (\text{III})$$

Onde:

C – Capacitância;

Q – Quantidade de Carga;

V – Potencial Elétrico.

A quantidade de carga Q, para um dado valor da tensão aplicada, é a soma de duas componentes: Q_0 , que é a carga que existiria se os eletrodos estivessem separados pelo vácuo, e Q_d , que é devida a polarização do dielétrico que na verdade separa os tais eletrodos.

$$Q = Q_0 + Q_d \quad (\text{IV})$$

Conforme Alonso e Finn (1972, p.144), a capacidade de um condutor é expressa em $[C.V^{-1}]$, uma unidade chamada *farad* (abreviada F) em homenagem a Michael Faraday. O farad é definido como a capacidade de um condutor isolado cujo potencial elétrico, depois de receber uma carga de um Coulomb, é um volt. Nos termos das unidades fundamentais temos que:

$$F = C.V^{-1} = m^{-2} \cdot Kg^{-1} \cdot s^2.C^2 \quad (\text{V})$$

6.1 Fatores que afetam a capacitância

“Para algumas voltagens características, os valores de capacitância de uma placa simples são diretamente proporcionais à geometria e a constante dielétrica do material e inversamente proporcional a densidade do dielétrico.” (LACCEF..., 2006, p. 21).

$$C=K.A/d \quad (\text{VI})$$

Onde:

C – Capacitância [F];

K – Constante dielétrica, adimensional - $8,85 \times 10^{-12}$ [F/m] (permissividade do vácuo);

A – Área das placas ou eletrodos [m²];

D – Distância entre as placas [m].

6.2 Efeitos termodinâmicos sobre a capacitância

Temperatura é o índice de agitação, movimentação das partículas constituintes alguma matéria, para Russel (1994, p.34), a temperatura de um objeto mede a energia cinética média de suas partículas. Quando o calor é transferido para um objeto, a energia cinética média de suas partículas componentes é aumentada, estas partículas movem-se então mais rapidamente e a temperatura do objeto aumenta. “A temperatura afeta sensivelmente o valor da resistividade e, de uma maneira geral, o aumento da temperatura provoca uma diminuição da resistividade dos materiais isolantes.” (UPE, 2013, f.1).

O nível de agitação das partículas (temperatura), que compõe os corpos (neste caso o óleo mineral isolante) influi diretamente sobre valor da rigidez dielétrica e sobre a viscosidade, que por sua vez esta diretamente relacionada com a entropia deste volume. Em termos de interação atômica, sabe-se que à medida que diminui a temperatura a união atômica tende a ser maior.

Segundo UFSC (2013, f.1), a temperatura causa interferência sobre o fenômeno da polarização, devem-se distinguir os tipos fundamentais de polarização:

6.2.1 Polarização eletrônica e iônica

Ocorre de um modo praticamente instantâneo sob a ação de um campo elétrico e sem dissipação de energia, se caracterizando por um deslocamento elástico de íons ou elétrons ligados ao núcleo de um átomo.

- a) Polarização Eletrônica: Diminui com o aumento da temperatura, devido a dilatação do dielétrico e conseqüente diminuição do número de partículas por unidade de volume.
- b) Polarização Iônica: É intensificada com o aumento da temperatura, uma vez que se debilitam as forças elásticas interiônicas quando aumentam as distâncias entre os íons quando o corpo se dilata;

6.2.2 Polarização dipolar

Difere da eletrônica e da iônica com relação ao movimento térmico das partículas. As moléculas dipolares, que se encontra em movimento térmico caótico, se orientam parcialmente pela ação do campo, o qual é a causa da polarização. A polarização dipolar é possível se as forças moleculares não impedirem os dipolos de se orientarem de acordo com o campo. Ao aumentar a temperatura se enfraquecem as forças moleculares e diminui a viscosidade da substância, de forma que se intensifica a polarização dipolar. No entanto, ao mesmo tempo aumenta a energia dos movimentos térmicos das moléculas, o que faz que diminua a influência orientadora do campo. De acordo com isto, a polarização dipolar aumenta a princípio com o aumento da temperatura, enquanto que o enfraquecimento das forças moleculares influencia mais que a intensificação do movimento térmico caótico. Depois, quando esta última se intensifica, a polarização dipolar cai a medida que aumenta a temperatura;

6.2.3 Polarização estrutural

Aparece apenas em corpos amorfos e em sólidos cristalinos polares como no caso do vidro, onde um corpo amorfo é parcialmente constituído de partículas de íons. A polarização estrutural vem a ser a orientação de estruturas complexas de material, perante a ação de um campo externo, aparecendo devido a um deslocamento de íons e dipolos, na presença de aquecimento devido a perdas Joule. Quanto a sua dependência com a temperatura têm comportamento semelhante à polarização dipolar.

6.3 Efeitos termodinâmicos sobre a viscosidade

“Viscosidade é uma força volumétrica que aparece no deslizamento de camadas fluidas umas sobre as outras, dando origem a tensões tangenciais.” (NUSSENZVEIG, 1983, p.59). “Viscosidade é definida como a resistência que um fluido oferece ao seu próprio movimento. Quanto menor for a sua viscosidade, maior será a sua capacidade de escoar (fluir).” (CASTROL, 2013, f.1). A mensuração da viscosidade esta diretamente relacionada a temperatura em que o fluido se encontra nas condições de ensaio. De acordo com Castrol (2013, f.1), a temperatura do teste deve ser constante, pois a viscosidade é uma propriedade que se altera de acordo com a variação da temperatura.

7 METODOLOGIA

Durante anos, empresas fabricantes de equipamentos de transformação, regulação e manobras, que equipam e são constituintes do SEP, produziram dispositivos que possuem mecanismos de acionamento limitado, ou seja, possuem apenas dois status lógicos de operação, que são basicamente, ligado ou desligado ou comutado e não comutado, por exemplo. Esta condição intrínseca proporciona a estes equipamentos o título de obsoletos, restringidos e com pouca opção de automatização.

Diante de uma nova realidade que estamos por presenciar a alguns poucos anos, deparamo-nos com um universo de comodismos, segurança, baixo custo operacional, confiabilidade; uma situação onde a máquina verifica as possibilidades e se ajusta para operar na melhor condição possível. Pode-se citar como exemplo o projeto "*Cidades do Futuro - Smart Grid*", desenvolvido pela CEMIG que trata justamente da questão abordada inicialmente, são equipamentos trabalhando em sinergias para evitar situações de redundâncias e buscar o rendimento teórico.

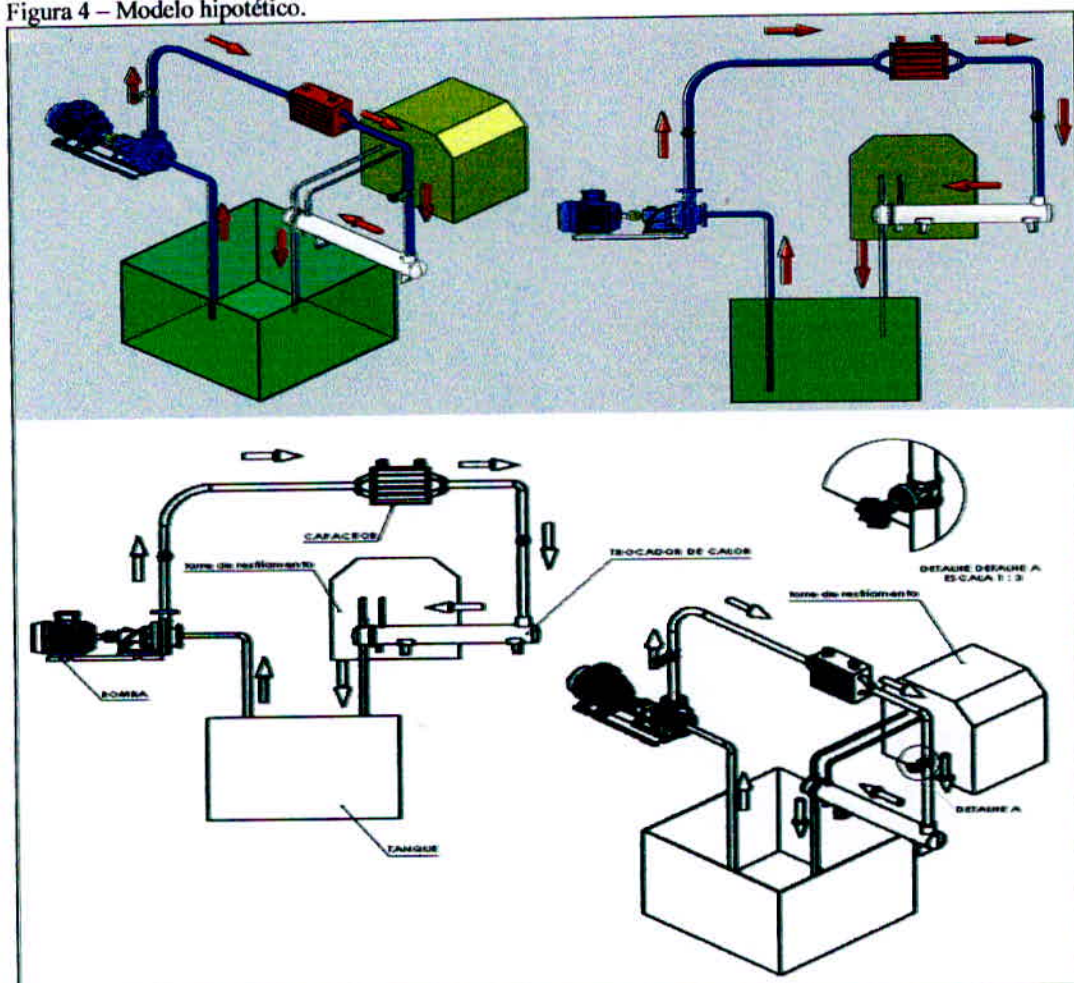
Como contribuição as possibilidades que estão por vir, propõe-se o projeto do capacitor variável para aplicação em subestações com circuitos de média ou alta tensão, cujo objetivo é regular o seu nível de capacitância em função de situações momentâneas, situações tais que podem requerer respostas opostas em função das cargas consumidoras que estão inseridas ao SEP, como é o caso do período diurno que apresenta picos de potência reativa indutiva (motores elétricos, fornos a indução, máquinas de solda, dentre muitos) é provocam afundamentos de tensão no circuito, exigindo o máximo de potência reativa capacitiva para contrabalancear esta situação e elevar o valor do fator de potência do circuito. Condições inversas ao período noturno, em que muitas fábricas paralisam suas atividades e diminuem a demanda por capacitores ligados ao sistema, tendo como agravante o próprio paralelismo das linhas de transmissão que formam a estrutura das armaduras de um capacitor juntamente com o ar, que tem papel de dielétrico, formando um capacitor de quilômetros de extensão, causando elevação aos níveis de tensão.

Para que ocorra variação de capacitância, a idéia seria mudar as características do material dielétrico, que como citado no "item 6.1", tem influência direta sobre o valor de capacitância. Submetendo o óleo mineral isolante a variações consideráveis de temperatura, teremos algumas alterações físicas em sua matéria, tais como: viscosidade, permeabilidade, resistência dielétrica, fenômeno de polarização e fator de potência. Estas variações

possibilitam a alteração do valor nominal de capacitância, garantindo ao mesmo a característica de ser variável.

Abaixo segue modelo hipotético para que altere a temperatura do óleo, provendo resfriamento ou aquecimento.

Figura 4 – Modelo hipotético.



Fonte: O Autor.

Com o sistema proposto, a lógica de funcionamento exigiria óleo quente durante o dia, período de máxima capacitância e óleo frio na madrugada, maior viscosidade correspondendo a menor permeabilidade é menor capacitância nominal.

Contudo, sabe-se que óleo utilizado como dielétrico em capacitores, não foi projetado para operar com variações bruscas e extremas, portanto faz-se necessário verificar o comportamento deste dielétrico e avaliar a possibilidade de utilização do mesmo para a nova situação de trabalho imposta, através do ensaio de rigidez dielétrica.

7.1 Normalizações

Não existe uma norma técnica específica que rege o ensaio, entretanto será adotado a que mais se aproximam do objetivo trabalho proposto.

A ABNT NBR 6869 (Líquidos isolantes elétricos - Determinação da rigidez dielétrica método de eletrodos de disco) de 31-12-1989, que trata de ensaio de rigidez dielétrica de líquido isolante e a ASTM (American Society for Testing and Materials) D877-02(2007), Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes (Método de teste padrão para tensão de ruptura dielétrica de líquidos isolantes através de eletrodos de disco) são as mais pertinentes ao trabalho.

7.2 Controles físicos

Para realização do ensaio algumas medidas cautelares devem ser observadas. De acordo com UFSC (2013, f.1), o fator de perdas de bons óleos isolantes, a 20°C, é de aproximadamente 0,001, dependendo acentuadamente da temperatura. Em grau menor, a luz do dia pode atuar no mesmo sentido, razão pela qual o óleo deve ficar protegido de seus raios de luz. A umidade presente no óleo provém geralmente do ar. Os produtos de oxidação reduzem a tensão superficial do óleo, aumentando a capacidade de associação entre água e óleo, que assim fica em estado de emulsão dentro do óleo. Essa água, mesmo em pequenas quantidades (o óleo a 60°C absorve 2% de água) irá influir de modo acentuado sobre a rigidez dielétrica do óleo. Problema semelhante ocorre se o óleo absorve gases, os quais também apresentam características isolantes inferiores às dos óleos, podendo levar assim a problema de baixa isolação. Sendo assim alguns controles devem ser previstos, tais como: monitoramento constante de temperatura de ensaio; controle da incidência de raios ultravioleta; verificação da umidade relativa do ar e conter possíveis gases que possam contaminar o óleo.

Segue relação dos equipamentos utilizados para os controles necessários citados:

- a) Termômetro digital, MINIPA MT-360;
- b) Termo higrômetro digital, MINIPA MT 241;
- c) Detector de gases, TIF XP-1A;

7.3 Recursos utilizados

Foram utilizadas as instalações da oficina da “Equipe de Transformação e Manobras” da empresa Cemig Distribuição S/A, localizada na Avenida Aristides Paiva, s/n – Vila Paiva – Varginha – MG, no prédio 04.

O ensaio foi monitorado pelos técnicos Edrênio José Vivas e Abelardo Dias, que contribuíram com sua vasta experiência e conhecimento técnico adequado para execução dos trabalhos técnicos.

A condução do ensaio foi amparada pelo referencial teórico contido na norma técnica ASTM D877-02(2007).

Foi utilizado o testador de rigidez dielétrica (TRD), modelo DPA 75C, fabricante BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH, fabricado no sul da Áustria. O equipamento DPA 75C serve para medição totalmente automática da resistência disruptiva de líquidos isolantes até 75 kV. Com DPA 75C podem ser testados líquidos isolantes com valores de tan delta < 4,5 ou uma resistência específica $\rho > 30 \text{ M}\Omega\text{m}$.

7.4 Características TRD DPA 75C – Manual Técnico

- a) Equipamento compacto e robusto para o uso portátil no local de teste;
- b) Tensões de teste de 0 a 75 kV rms;
- c) Medições de ruptura dielétrica repetíveis em óleos minerais, de silicone e vegetais;
- d) Resultados de teste confiáveis através de curtíssimo tempo de desligamento (<10 μs);
- e) Operação autárquica possível com bateria recarregável integrada ou operação de rede
- f) Interface de usuário em 12 idiomas
- g) Design funcional para elevada eficiência, facilidade de uso e segurança com necessidade com plena mobilidade;
- h) Clara detecção de ruptura dielétrica através da técnica RBM e novo princípio de medição diretamente na parte HV
- i) Auto-teste automático com teste da tensão de saída HV
- j) Processo de medição totalmente automático de 19 normas de teste pré-programadas e 10 processos de teste livremente programáveis;
- k) Registrador de temperatura integrado do líquido isolante
- l) Unidade de operação ergonômica com teclado de membrana resistente a óleo, display colorido LCD de boa legibilidade e impressora integrada;
- m) Blindagem CEM para evitar interferências em equipamentos de processamento eletrônico de dados;

- n) Medições sem a influência de ar através de recipientes de teste de alta qualidade (compatíveis com recipientes DPA 75);
- o) Ajuste preciso das distâncias padrão entre os eletrodos;
- p) Proteção de transporte para recipiente de teste;
- q) Interface de PC inclusive software para o controle, protocolamento e arquivamento das medições (opcional).

Quadro 1 – Especificações técnicas TRD DPA 75C.

Alimentação de tensão	85 V ... 264 V (47 Hz ... 63 Hz)	Sequências de teste livremente programáveis	10
Consumo de potência	máx. 60 VA	Interface	USB 2.0
Bateria recarregável interna	2 x 6 V / 6,5 Ah - aprox. 8h de operação autárquica	Impressora	Impressora matricial, 24 caracteres, 57 mm papel normal
Sinal de saída	0 ... 75 kV _{RMS} simétrico	Temperatura ambiente	-10 ... +55°C
Para líquidos isolantes com valores tan-δ	< 4,5 ou uma resistência específica $\rho > 30 \text{ M}\Omega\text{m}$	Temperatura de armazenamento	-20 ... +60°C
Velocidade de aumento da tensão	0,5...10 kV/s	Umidade relativa do ar	sem condensação
Tempo de desligamento	< 10 μs	Dimensões (L x A x P)	476 x 372 x 340 mm (fechado) 476 x 635 x 420 mm (aberto)
Controle de tensão	Monitoramento do colapso real (real breakdown monitoring)	Peso sem opcionais	29 kg
Medição interna da temperatura da amostra de óleo	0 ... 99°C	Classe de proteção	IP 32
Resolução de temperatura	1°C	Projetado e fabricado de acordo com as normas	IEC 61010-1, EN 61010-1, VDE 0411 Parte 1
Exatidão	0 ... 75 kV $\pm 1 \text{ kV}$	Monitor	Display colorido LCD (320x240)
Resolução	0,1 kV	Idiomas	Alemão, inglês, francês, espanhol, italiano, português, holandês, polonês, russo, chinês (Cn), chinês (Tw), tcheco
Normas pré-programadas	ASTM D 1816-04 1 mm, ASTM D 1816-04 2 mm, ASTM D 1816/97, ASTM D 877 / 2002 PA, ASTM D 877 / 2002 PB, BS EN 60156, CEI EN 60156, CSSR RVHP / 1985, IEC 60156 / 1995-05, IRAM 2341 / 1972, JIS C2101 / 1999, PN 77 / E-04408, SEV EN 60156, UNE EN 60156, NF EN 60156, SABS EN 60156, VDE 0370 Parte 5 / 96, AS1767.2.1, Disparo único		

Fonte: BAUR DPA 75C (2013, p.60).

7.5 Características da amostra

Segue detalhamento das características da amostra.

Fabricante: Petrobras

Tipo: LUBRAX AV 60 IN

Descrição: Óleo mineral isolante para equipamentos elétricos, recomendado para uso em transformadores, reatores, disjuntores e equipamentos de manobra operando sob qualquer classe de tensão. Também é indicado para uso em transformadores em que houver necessidade de prolongar a vida útil do óleo. Apresenta um baixo fator de potência, alta estabilidade à oxidação e baixa corrosão ao cobre, atendendo às mais severas especificações dos fabricantes de equipamentos. Produzido a partir de óleos básicos naftênicos hidrotratados, aditivado com inibidor de oxidação (BHT). Atende às especificações da ANP (Resolução ANP 36/2008) e da ASTM D-3487. Disponível em embalagens 200L ou a granel.

Classificação: ANP 36/2008 (tipo A) e ASTM D-3487 (type II).

Quadro 2 – Características do Óleo LUBRAX AV 60 IN.

Propriedade	Método	Resultado
Densidade 20/4°C	ASTM D 4052	0,888
Viscosidade a 40°C	ASTM D 445	10,0 cSt
Viscosidade a 100°C	ASTM D 445	2,4 cSt
Ponto de fulgor - vaso aberto	ASTM D 92	152 °C
Ponto de fluidez	ASTM D 97	-61 °C
Tensão interfacial a 25°C	ASTM D 971	47 dyn/cm
Ponto de anilina	ASTM D 611	75 °C
Rigidez dielétrica, eletrodos de disco, 2,5 mm	ASTM D 877	47 kV
Fator de potência a 90°C	ASTM D 924	0,04%
Água	ASTM D 1533	20 ppm ⁽³⁾
teor de BHT	infravermelho	0,3 %m
Índice de acidez total	ASTM D 974	0,01 mgKOH/g
Cloretos e sulfatos	ASTM D 878	ausentes
Enxofre corrosivo	NBR 10505 / ASTM D 1275B	não corrosivo
Estabilidade à oxidação, 164h	ASTM D 2440	
. lodo		0,01 %p
. índice de acidez total		0,02 mgKOH/g
Bomba rotatória	ASTM D 2112	318 min

Fonte: PETROBRAS (2013, f.1).

7.6 Procedimentos ASTM D877

Como o óleo a ensaiar é certificado pelo método regado pela norma ASTM D877, tomou-se como referencial o seu valor de rigidez elétrica característica apresentando valor de 40 kV à temperatura de 20°C e utilizando eletrodos de disco distanciados a 2,5 milímetros.

O sistema utiliza eletrodos de disco com diâmetros 25 milímetros e discos separados de 2,5 mm. A célula é cheia com óleo para cobrir os eletrodos, para, pelo menos, uma profundidade de 20 mm e a amostra é deixada a repousar durante pelo menos 2 minutos, sem agitação.

Uma tensão de onda sinusoidal de 60 Hz é aplicada a uma taxa de rampa de 3000 V/s, até ruptura ocorrer, conforme indicado pela passagem de uma corrente através da amostra, de 2 a 20 mA. Esta ocorrência é utilizado para disparar um relê no prazo de 3 a 5 ciclos de tensão que impede a rampa e manter a tensão de ruptura. Uma série de determinações são feitas, as quais são então tratados estatisticamente para se obter o valor final.

7.7 Significado e uso – Texto traduzido da norma ASTM D877

A tensão de ruptura dielétrica é uma medida da capacidade de um líquido isolante para resistir à tensão elétrica. A tensão de ruptura de frequência de potência de um líquido é reduzida pela presença de contaminantes tais como fibras celulósicas, partículas condutoras, sujidade e água. Um baixo resultado neste método de teste indica a presença de concentrações significativas de um ou mais destes contaminantes no líquido testado. Veja [Apêndice XI](#).

Uma voltagem elevada desagregação medidos neste método de ensaio não indica necessariamente que a quantidade de contaminantes presentes em um líquido a partir do qual foi colhida a amostra é suficientemente baixo para que o líquido de amostragem a ser aceitável em todos os equipamentos elétricos. Método de Ensaio D 877 não é sensível a baixos níveis destes contaminantes. Composição neste método de ensaio é dominada por eventos que ocorrem nas extremidades dos elétrodos. A distribuição da tensão elétrica entre os elétrodos de discos paralelos utilizados neste método são quase uniforme e não há substancial concentração de tensão nas extremidades afiadas das faces planas do disco.

Este método pode ser utilizado para avaliação de líquidos isolantes em equipamentos que se destina a ser preenchido com líquidos não transformados, entregues por um fornecedor.

Este método de ensaio não é recomendado para a avaliação da tensão de ruptura dos líquidos usados no equipamento que requer a aplicação de vácuo e de filtragem do óleo antes

de ser colocado em serviço. Método D 1816 deve ser usado para determinar a tensão de ruptura dos líquidos filtrados e degaseificados.

Este método de ensaio é usado em testes de laboratório ou no campo. Para obter resultados de degradação de campo para ser comparável com os resultados de laboratório, devem ser cumpridos todos os critérios, incluindo a temperatura ambiente (20 a 30° C).

7.8 Escopo – Texto traduzido da norma ASTM D877

Tradução livre do capítulo 1 da norma técnica ASTM D877.

1.1 Este método de ensaio descreve dois processos, A e B, para determinar a tensão de ruptura de isolamento elétrico de amostras líquidas. O teste de quebra usa tensão alternada na faixa de frequência de potência 45-65 Hz.

1.2 Este método é utilizado para julgar se os eletrodos requisitados a tensão de ruptura de disco são cumpridos para líquidos isolantes, como liberados do fabricante, que nunca foram filtradas ou secas. Veja Especificação D 3487, especificação D 4652, e Guia D 5222 para a repartição mínima especificada elétrica. Este método deve ser usado como recomendado pelos padrões de organização profissional, como IEEE C57.106.

1.3 Limitações dos Procedimentos

1.3.1 A sensibilidade deste método de ensaio para a população em geral de contaminantes presentes em uma amostra de líquido de teste diminui à medida que voltagens aplicadas utilizados neste método de ensaio se tornar maior do que cerca de 25 kV rms.

1.3.2 Se a concentração de água na amostra à temperatura ambiente é inferior a 60% da saturação, a sensibilidade deste método de ensaio para a presença de água diminui. Para mais informações consulte RR: D27-1006.

1.3.3 A aptidão para este método de ensaio não foi determinada para a viscosidade de um líquido superior a 900 cSt a 40C.

1.4 Os pedidos de procedimento

1.4.1 Procedimento A

Processo A é usado para determinar a tensão de ruptura de líquidos em que quaisquer produtos de degradações insolúveis resolverem facilmente durante o intervalo entre os testes repetidos de degradação requeridos. Estes líquidos incluem óleos de petróleo, hidrocarbonetos e askarels (PCB), utilizado como isolantes e líquidos de arrefecimento em transformadores, cabos e aparelhos semelhantes.

Processo A pode ser utilizado para se obter a ruptura dielétrica do fluido de silicone, tal como especificado nos Métodos de Teste D 2225, fornecer a energia de descarga em que a amostra é inferior a 20 mJ (mili joule) por repartição por cinco avarias consecutivos.

1.4.2 procedimento B This procedimento é usado para determinar a tensão de ruptura de líquidos em que quaisquer produtos de degradação insolúveis não resolver completamente o espaço entre os discos, durante o intervalo de 1 minuto necessária no Procedimento A. Procedimento B, modificado de acordo com a Secção 17 Métodos de Ensaio D 2225, é aceitável para ensaiar os líquidos dielétricos de silicone, se as exigências de não pode ser alcançado.

Procedimento B também deve ser aplicado para a determinação da tensão de ruptura das amostras de líquidos contendo materiais insolúveis que se depositam a partir da amostra durante o ensaio. Estes podem incluir amostras colhidas em disjuntores, comutadores e outros líquidos altamente contaminados com material particulado insolúvel. Estes exemplos representam as amostras que podem ter grandes diferenças entre os ensaios replicados. O uso do Procedimento B irá resultar num valor mais preciso de tensão de ruptura ao testar tais líquidos.

Use o procedimento B para estabelecer a tensão de ruptura de um líquido isolante em uma especificação ASTM não existe ou no desenvolvimento de um valor para um guia ou norma ASTM. Processo A pode ser utilizado uma vez que o operador de precisão simples tem sido demonstrado.

1.5 Tanto o SI e as unidades de polegada-libra são igualmente aceitáveis.

Esta Norma não pretende tratar de todas as questões de segurança, que esteja associado ao seu uso. É de responsabilidade do usuário desta norma para estabelecer práticas de segurança e saúde apropriadas e determinar a aplicabilidade de limitações regulamentares antes de usar.

8 ENSAIO PRÁTICO

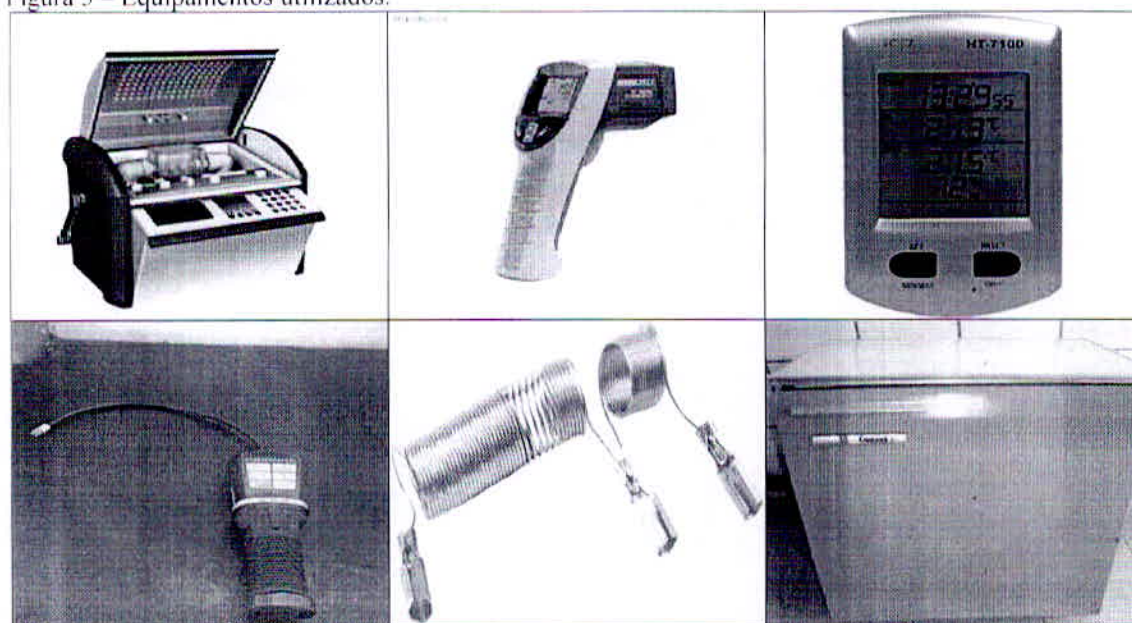
A seguir segue descrição de como ocorreu o ensaio do OMI, nas condições proposta.

8.1 Relação de equipamentos e materiais

Segue a abaixo a relação de equipamentos utilizados:

- a) TRD, BAUR DPA 75C;
- b) Termômetro digital, MINIPA MT-360;
- c) Termo higrômetro digital, MINIPA MT 241;
- d) Detector de gases, modelo: TIF XP-1A;
- e) Aquecedor elétrico resistivo de 5500W;
- f) Refrigerador tipo “Freezer”.

Figura 5 – Equipamentos utilizados.



Fonte: O autor.

Segue a abaixo a relação de materiais utilizados:

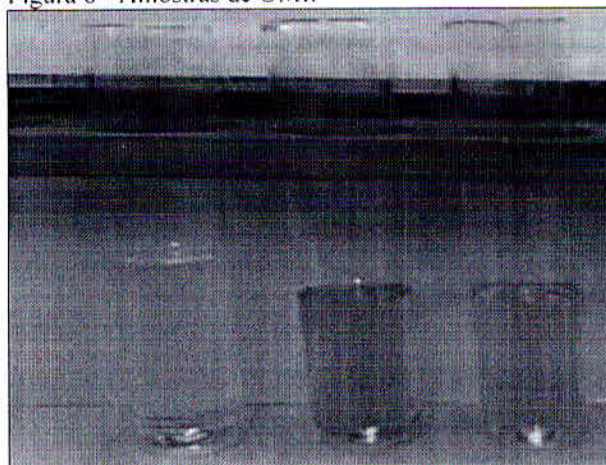
- a) Óleo mineral isolante LUBRAX AV 64 IN;
- b) Flanelas de algodão;
- c) Solvente;
- d) Papel de soda seco.

8.2 Etapas do processo de ensaio

Segue detalhamento de como ocorreu o ensaio.

Etapa 01: Selecionar a amostra de material para ensaio;

Figura 6 - Amostras de OMI.



Fonte: O autor.

Etapa 02: Subdividir a amostra em pequenas partes iguais;

Etapa 03: Utilizar de catalogo técnico do fabricante, para comparar valores (referência);

Etapa 04: Manter controle das condições climáticas do ambiente (temperatura e umidade relativa do ar). Condições no momento do ensaio: Temperatura ambiente: 27,5°C e umidade relativa: 42%.

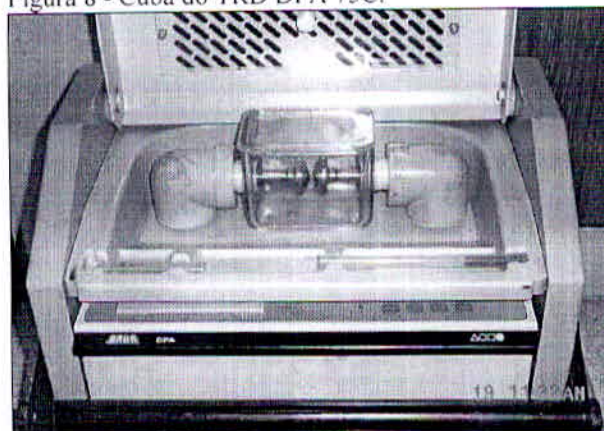
Figura 7 - Condições Climáticas



Fonte: O autor.

Etapa 05: Lançar mão da célula de ensaio, no caso eletrodos de disco;

Figura 8 - Cuba do TRD DPA 75C.



Fonte: Autor.

Etapa 06: Verificar o laudo de aferição do equipamento;

Etapa 07: Efetuar previa limpeza dos eletrodos com solvente e papel de soda seco;

Etapa 08: Ajustar a distância de entre eletrodos em 2,5 mm;

Figura 9 - Ajuste do eletrodo.



Fonte: Manual técnico TRD DPA 75C.

Etapa 09: Estipular as temperaturas do óleo para o ensaio;

Etapa 10: Aquecer as sub-amostras que deverão ser ensaiadas a temperatura superior a ambiente e resfriar as sub-amostras que deverão ser ensaiadas a temperatura inferior a ambiente;

Etapa 11: Agitar suavemente o frasco que contém a sub-amostra a ensaiar, de modo que as eventuais partículas suspensas no líquido possam ficar em suspensão;

Etapa 12: Repousar o líquido para que as eventuais bolhas de ar possam ser expelidas

Etapa 14: Ensaiar as sub-amostras na célula de ensaio.

9 RESULTADOS

Abaixo segue o resultado do ensaio, o tratamento estático amostral é calculado pelo TRD (Testador de rigidez dielétrica), dispensando detalhamento de cálculos.

Tabela 2 - Resultados obtidos para o OMI.

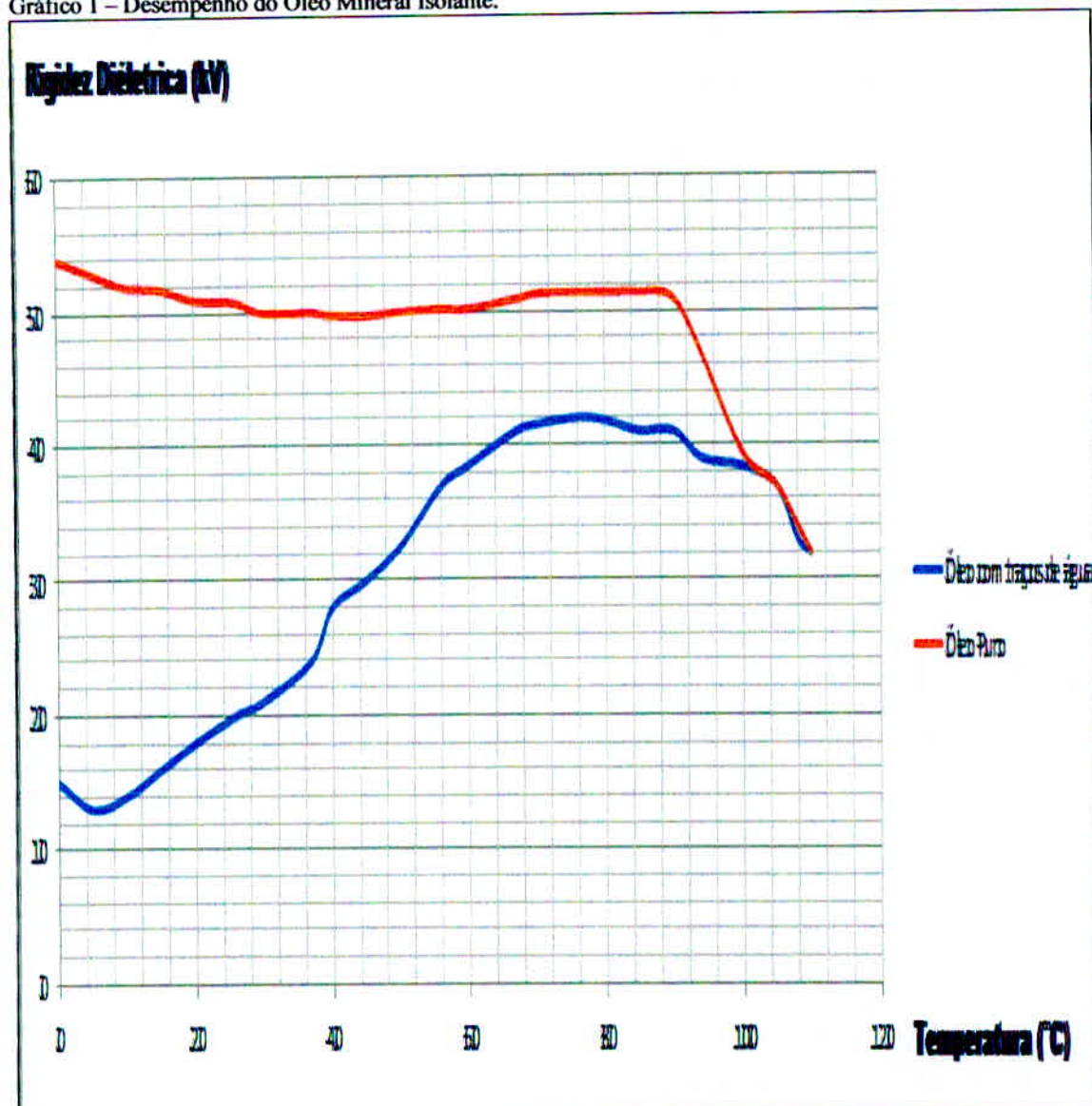
Temperatura (°C)	Rigidez Dielétrica (kV)	
	Óleo com traços de água	Óleo Puro
0	15	54
5	13	53
10	14	52
15	16	51,8
20	18	51
26	20	50,8
30	21	50
37	24	50
40	28	49,8
45	30	49,7
50	32,5	50
56	37	50,2
60	38,5	50,2
67	41	50,9
70	41,5	51,3
76	42	51,4
80	41,8	51,4
85	41	51,42
90	41	51
94	39	47
100	38,4	39,4
105	37	37
108	33	34
110	32	32

Fonte: O autor.

9.1 Estratificações dos resultados

Após o ensaio da rigidez dielétrica do óleo, segue a estratificação do desempenho da amostra em um gráfico que exprime a sua curva característica relacionando tensão de ruptura com a temperatura de ensaio. A envolvente caracteriza o desempenho do óleo mineral isolante.

Gráfico 1 – Desempenho do Óleo Mineral Isolante.



Fonte: O autor.

9.2 Protocolos de medição como impressão

A seguir modelo de relatório gerado pelo TRD DPA 75C.

Figura 10 - Relatório DPA 75C.

Protocolo de medição	
BAUR DPA 75 C	
Versão	V1.00
12.08.2011	10:12
Número da amostra:	
1002091355	
Medição normalizada:	
ASTM D 877	
Forma de eletrodo:	
ASTM D 877	
Distância:	2,5 mm
Frequência de teste:	60 Hz
Temperatura	20°C
Teste 1	47,2 kV
Teste 2	43,2 kV
Teste 3	44,4 kV
Teste 4	46,9 kV
Teste 5	44,6 kV
Teste 6	21,7 kV
Valor Médio	41,3 kV
Desvio padrão	9,7 kV
D/M	23,6%
Teste finalizado com sucesso!	
Efetuated por:	

Fonte: TRD DPA 75C.

10 DISCUSSÃO

Observando a curva característica expressa pelo “gráfico 01” é nítida a estabilidade do fluido puro quando ocorrem variações de temperatura em condições normais de operação, condições tais que podem chegar a temperatura de cerca de 3°C em regiões mais amenas do estado de Minas Gerais, como a cidade de Maria da Fé e até 40°C em locais de clima mais árido como em Montes Claros situada ao norte de Minas Gerais.

Este resultado comprova que o produto da Petrobrás atende bem as condições de utilização imposta pelas muitas condições climáticas existentes, não só em Minas Gerais, mas no Brasil todo.

Tomando como referencial o desempenho do óleo, o projeto é inviável, pois para que ocorra variação significativa no valor de rigidez é necessário submeter o mesmo a temperatura de trabalho acima de 100°C , como é de conhecimento o quadro de características do óleo LUBRAX AV 60 IN informa um limite referente ao ponto de fulgor de 152°C , nesta faixa o óleo estaria em condição muito próxima a de auto ignição. Por questões de segurança não se faz jus a sua aplicação.

Toda via ao se analisar uma amostra contaminada com resíduos de água, percebe-se que ocorrem variações significativas na curva característica, a rigidez dielétrica é fortemente alterada em função desta contaminação, saindo de um valor característico que varia entre 15 a 18 kV, em temperatura ambiente de 25°C a um extremo de cerca de 42 kv. Não se pode deixar de considerar, que o mesmo só chegou a este valor extremo devido à evaporação da água que estava emulsificada no óleo.

Este trabalho trata apenas de um experimento que demonstra o desempenho do dielétrico em questão. O ensaio estaria fadado ao insucesso se não fosse verificado o comportamento de uma amostra contaminada, que demonstrou ser possível mudar as características intrínsecas do óleo ao acrescentar um aditivo. Aditivo que não seria o mais indicado, pois equipamento elétrico possui aversão a humidade.

O incremento de um aditivo adequado viabilizaria o projeto e cumpriria o objetivo proposto, garantindo ao fluido a característica de sofrer alterações bruscas em sua curva de rigidez e conseqüentemente alterar a característica do dielétrico.

11 CONCLUSÃO

Este projeto apresentou o comportamento da rigidez dielétrica do óleo mineral isolante ao ser exposto a variações de temperatura, verificou-se que em situações normais o projeto não é aplicável, mas com o incremento de aditivos ao óleo mineral isolante, o mesmo pode tornar-se viável e aplicável aos capacitores de média tensão que são constituintes do sistema elétrico de potência.

O produto final visa em primeiro lugar reduzir o custo operacional, principalmente na operação de manobras para ajustes adequados de níveis de capacitância, atendendo as solicitações do sistema em tempo real, situação que atualmente não é possível devido à inviabilidade do custo relacionado a mão de obra para executar tal operação e também como única opção conhecida até o presente momento a utilização de dispositivos de comutação telecomandados, que demandam grande investimento por parte das concessionárias tornando-se inviável.

Outro aspecto relevante que justificou tal projeto seria a sua segurança operacional, pois como o conjunto sugere um automatismo, pessoas teriam mínimo contato com o equipamento, levando-se em conta relatos de operadores que sempre alertam sobre o seu potencial destrutivo em caso de falha do equipamento.

A demanda por novas tecnologias e automatismo foram os principais motivadores deste trabalho. O primeiro passo foi dado, agora novos projetos poderão ser desenvolvidos, como, por exemplo, o trocador adequado para efetuar as trocas de temperatura do óleo mineral isolante e fazer cumprir a função variar a capacitância dos equipamentos (capacitores).

O desenvolvimento deste projeto proporcionou o crescimento profissional e mostrou horizontes pertinentes a engenharia.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, Marcelo; FINN, Edward J. **Física um curso universitário**: campos e ondas. 3. ed. São Paulo. Edgard Blucher, 1977. v. 2.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 6023:2005: Documentação: referências. Rio de Janeiro, 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D877-02(2007). Disponível em: <<http://www.astm.org/Standards/D877.htm>>. Acesso em: 01/09/13.
- BAUR Prüf- und Messtechnik GmbH. **Manual Técnico TRD DPA 75C**. Sulz, Austria, 2013.
- CASTROL. **Viscosidade**. 2013. Disponível em: <<http://www.castrol.com/castrol/sectiongenericarticle.do?categoryId=9025406&contentId=7047476>>. Acesso em: 08/03/13.
- ENGELETRICA. **Óleo Mineral Isolante**. Disponível em: <<http://www.engeletrica.com.br/wordpress/oleo-mineral-isolante/>>. Acesso em 08/03/13.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. **Fundamentos de Física: Física 3**. 5. ed. Rio de Janeiro. LTC, 2004. v. 3.
- LACCEF. **Laboratório de Compósitos e Cerâmicas Funcionais**. Presidente Prudente, SP, 2006. (Apostila Materiais Dielétricos. Versão 1).
- LACTEC. **Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento**. Curitiba, PR, 2013. (Apostila Líquidos Isolantes, Módulo II).
- LEARNABOUT ELECTRONICS. **Capacitors**. 2013. Disponível em: <http://www.learnabout-electronics.org/ac_theory/capacitors01.php>. Acessado em 01/09/13.
- NUSSENZVEIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica 2**: fluidos, oscilações e ondas de calor. 2. ed. São Paulo. Edgard Blucher, 1983. v. 2.
- PETROBRAS. **Lubrificantes Industriais**. 2013. Disponível em: <http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/lubraxe/!ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3gjf09TAxcjT1__YEdXA0_XEDP_MD9zd2MLY_2CbEdFAEMzpiw!/?PC_7_20150D21MOSAE0IET6OVN7G3A2000000_WCM_CONTEXT=/wps/wcm/connect/portal%20de%20conteudo/Hot+Site/Lubraxe/Industriais/Linha+Industrial+-+Isolantes>. Acesso em: 01/09/13.
- RUSSEL John, B., **Química Geral**. 2. Ed. São Paulo. Pearson, 1994. v. 1
- TIPLER, Paul A. **Física**. 2. ed. Rio de Janeiro. Guanabara, 1984. v. 1.
- UFERSA. **Eletricidade e magnetismo**. 2013. Disponível em: <http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores/178/arquivos/Eletricidade_Magnetismo/Aula_02.pdf>. Acesso em: 08/03/13.

UFMS. **Materiais**. 2013. Disponível em: <<http://www.del.ufms.br/Materiais.pdf>>. Acesso em: 07/03/13

UFSC. **Materiais Isolantes**. 2013. Disponível em: <http://www.labspot.ufsc.br/~jackie/cap4_new.pdf>. Acesso em: 07/03/13

YOUNG, Hugh D; FREEDMAN, Roger A. **Física 3: eletromagnetismo**. 12. ed. São Paulo. Pearson, 2009. v. 3.