

Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH

AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE ISOLAÇÃO EM ALTA TENSÃO - SIGNIFICADO ELETRODINÂMICO DOS TESTES TÍPICAMENTE ESPECIFICADOS

J. Johnny Rocha E.^{(1)(*)}; Marco A. S. Mauro⁽²⁾; Edson C. Bortoni⁽³⁾; Gilberto Gusmão⁽⁴⁾
⁽¹⁾Trassinio Consultoria; ⁽²⁾Itaipu Binacional; ⁽³⁾UNIFEI; ⁽⁴⁾Von Roll

RESUMO

Propõe-se discorrer sobre o comportamento dos materiais isolantes, tratando-os como circuitos que permitam modelar os fenômenos de interação molecular que ocorrem quando o isolante se encontra imerso nos campos elétricos presentes durante os testes de aceitação em alta tensão.

Fala-se em procedimentos e valores regulados por normas, sem que haja uma interpretação palatável daquilo que se propõe observar/avaliar. Há uma carência de referências bibliográficas adequadas que discorram sobre os fundamentos que regem cada ensaio proposto e a sua finalidade, o que se deve observar e, principalmente, quais os princípios da eletrodinâmica e da ciência dos materiais que sustentam cada ensaio.

PALAVRAS-CHAVE

Hidrogerador, sistema de isolação, condução, polarização, relaxamento, ensaios de aceitação, ensaios de tipo.

1.0 - INTRODUÇÃO

As partículas carregadas nos materiais, íons e elétrons, normalmente apresentam movimentos vibratórios de caráter ondulatório randômico livre. Todavia, na presença de campos eletromagnéticos, essa condição de múltiplos graus de liberdade muda totalmente. Sob a influência do campo elétrico se superpõem forças direcionais de atração a esses movimentos livres, de forma que o movimento dos íons ou elétrons não fica mais ao acaso, pois os campos elétricos, ao interagirem com partículas carregadas em materiais, podem produzir condução ou polarização dielétrica ou, ainda, manifestações magnéticas, a depender da sua estrutura molecular. Por isso, quando visto sob a ótica da ciência dos materiais, aprendemos que não existem materiais isolantes (apenas os denominamos assim), pois na realidade são materiais com péssimas propriedades de condução [CITATION Van70 \l 1046].

Na eletrodinâmica [CITATION Gri13 \l 1046] aprendemos que, se nos materiais tidos como bons condutores temos uma fonte ilimitada de cargas livres para se movimentarem pelo material; nos materiais péssimos condutores (isolantes ou dielétricos), em contrapartida, todas as cargas estão estreitamente ligadas a átomos ou moléculas específicas. Desse modo, quando esses materiais são submetidos à ação de um campo eletromagnético, o núcleo -rico em cargas positivas- tende a se movimentar em direção ao lado negativo da fonte; por sua vez, todas as suas camadas de elétrons -ricos em cargas negativas- tendem a formar uma nuvem no lado positivo da fonte e, se o campo eletromagnético for moderadamente forte, essa deformação atômica alcança um equilíbrio, deixando o átomo polarizado, com a carga positiva ligeiramente deslocada para um lado e a negativa para o outro, formando um dipolo que aponta na mesma direção do campo eletromagnético de ação.

(*) Rua das Camélias, n° 333 – CEP 06355 400 Carapicuíba, SP – Brasil

Sob os princípios da eletrodinâmica e da ciência dos materiais, o presente informe técnico se propõe a discorrer sobre o comportamento dos materiais isolantes, tratando-os na forma de circuitos equivalentes que permitam modelar os fenômenos de interação molecular que ocorrem quando o isolante se encontra na presença de campos elétricos, principalmente aqueles promovidos durante os testes de alta tensão e/ou de aceitação.

Afinal, são testes de rotina, de tipo, funcionais, de aceitação... enfim, muito se solicita e se normatiza sobre como avaliar o material isolante que, na atualidade, é formado em sua maioria por compósitos de mica, resina epóxi ou poliéster junto a um tecido de fibra de vidro ou filme adequado.

2.0 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A busca por materiais isolantes adequados, bem como por materiais condutores, caminha junto com a conceituação da eletricidade. E não poderia ser diferente se considerarmos que a 1ª edição do livro contendo as leis de Maxwell foi publicado em 1873 e que, no fim desse século, a parafina já tinha sido identificada como um dos melhores materiais isolantes, mesmo superior à mica; sendo por isso utilizado, sob a forma de papel parafinado, apesar de suas limitações térmicas, no primeiro gerador trifásico projetado por Charles E. L. Brown junto com Michael von Dolivo-Dobrowolsky.

Tomando esse cenário, procurar-se-á por uma definição amena para condutividade e, como uma consequência natural, a definição de isolante elétrico surgirá associada ao conceito de polarização.

Dentro do contexto estrutural atômico de materiais, os campos elétricos podem interagir com as suas partículas, produzindo: condutividade; polarização dielétrica e características magnéticas. Essas partículas carregadas, íons ou elétrons, que normalmente apresentam um movimento vibratório de caráter ondulatório randômico, quando na presença de um campo eletromagnético, adquirem uma condição direcional pois o campo superpõe forças direcionais de atração a esse movimento, de forma que as partículas não ficam mais ao acaso. Assim, a extensão em que essas partículas podem ser afetadas pelo campo eletromagnético depende dos elétrons na camada de valência, do spin associado aos átomos e da estrutura cristalina ou amorfa do material [CITATION Van70 \l 1046].

2.1 A condutividade elétrica

Há uma corrente de pensamento que amparada pela lei de Ohm define condutividade ou resistividade como uma constante empírica [CITATION Gri13 \l 1046]. Todavia, estamos em busca de um entendimento que nos permita elaborar uma percepção dos acontecimentos ao nível de partículas carregadas, sejam íons ou elétrons. Assim, associaremos a *condutividade elétrica* ao movimento de cargas elétricas, portadoras de massa ou não, de uma posição para outra. Para isso, os íons ou elétrons encarregados de transportar tais cargas, cuja mobilidade varia de material para material, estabelecem um verdadeiro espectro de condutividade, desde os altamente condutores até os isolantes quase perfeitos. Veja a Figura 1. Na *condutividade iônica*, os portadores de carga podem ser tanto cátions como ânions. Já na *condutividade eletrônica*, os portadores são elétrons ou buracos eletrônicos. Como os íons contêm ou uma deficiência ou um excesso de elétrons, a carga é sempre um múltiplo inteiro da carga de um elétron igual a $1,6 \cdot 10^{-19}$ [Coulomb ou A.s].

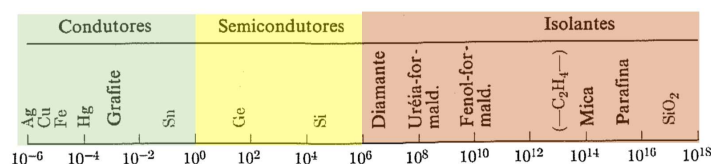


Figura 1 – Espectro de resistividades [Ω.cm] em escala logarítmica. A resistividade é o recíproco da condutividade.

A condutividade σ pode ser expressa como um produto do número de transportadores de carga por unidade de volume de material n , com a carga q carregada por cada transportador e pela *mobilidade de deriva* μ intrínseca dos transportadores [CITATION Van70 \l 1046], ou seja,

$$\sigma = n \cdot q \cdot \mu \left[\frac{1}{\Omega \cdot m} \right] = \left[\frac{\text{transportador}}{m^3} \right] \cdot \left[\frac{A \cdot s}{\text{transportador}} \right] \cdot \left[\frac{m^2}{V \cdot s} \right] \quad (1)$$

Assim, condutores são substâncias que contêm uma fonte “ilimitada” de cargas livres para se movimentarem através do material. Na prática, o que isso normalmente significa é que muitos elétrons (um ou dois por átomo em um metal típico) não estão associados a qualquer núcleo em particular, mas transitam ou derivam à vontade.

2.2 A polarização dielétrica

Nos dielétricos ou isolantes, em contrapartida aos condutores, todas as cargas estão ligadas a átomos ou moléculas específicas, elas estão presas com rédea curta e só podem se movimentar um pouco dentro do átomo ou molécula. Tais deslocamentos microscópicos não são tão radicais quanto a reorganização por atacado da carga em um condutor, mas seus efeitos cumulativos respondem pelo comportamento característico dos materiais dielétricos. Existem, de fato, dois mecanismos principais por meio dos quais os campos elétricos podem distorcer a distribuição de carga de um átomo ou molécula dos dielétricos: estiramento e rotação de alinhamento.

Embora os átomos e as moléculas sejam eletricamente neutros, são afetados pelos campos elétricos, pois têm cargas positivas e negativas. Assim, em alguns átomos ou moléculas, a nuvem de elétrons pode ser considerada esfericamente simétrica, e o seu centro de carga está no centro do átomo que coincide com a carga positiva. Nessas condições é dito que o átomo ou molécula está num estado *apolar*, Figura 2(a).

Na presença de um campo elétrico externo, o centro da carga positiva não coincide com o centro da carga negativa. O campo elétrico exerce uma força tanto sobre o núcleo positivo como na nuvem negativa. As cargas positivas e negativas se movimentam em sentidos opostos promovendo uma *distorção de estreitamento* então se diz que essa condição de carga pode ser emulada por um modelo denominado como *dipolo*. Resulta de um deslocamento do centro das cargas carregadas negativamente em relação ao núcleo positivo do átomo, quando subjugado a um campo elétrico externo. Ilustrado na Figura 2(b).

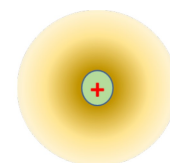


Figura 2(a) – estado apolar

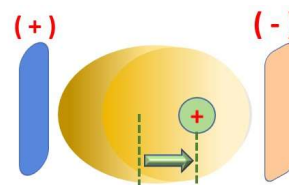


Figura 2(b) – condição polarizada

O fato extraordinário é que essas cargas positivas e negativas ocorrem em quantidades exatamente iguais, em grau de precisão fantástico na matéria condensada, de forma que seus efeitos se tornam praticamente neutralizados. Se não fosse assim estaríamos sujeitos a forças imensas: uma batata explodiria se esse cancelamento tivesse uma imperfeição tão mínima como uma parte em 10^{10} [CITATION Gri13 \l 1046].

A carga é conservada, ela não pode ser criada ou destruída (uma carga positiva pode anular uma carga equivalente, mas uma carga positiva ou negativa não pode, simplesmente, desaparecer por si só. Portanto, a carga total do universo está fixada para todo o sempre. Essa é a chamada conservação global de carga e está sujeita a uma condição de continuidade.

Embora o átomo como um todo seja eletricamente nulo, existe um cerne extremamente pesado com cargas positivas (o núcleo) e uma nuvem de elétrons, leves e altamente velozes, com carga negativa que o cerca. Essas duas regiões são influenciadas pelo campo elétrico: os elétrons muito mais rápidos se aglomeram sobre o lado positivo do campo, enquanto isso, mais vagarosamente, o núcleo é empurrado com relativa lentidão na direção oposta (Figura 2(b)). Essa condição é típica de cada material. Ou seja, se o campo for de natureza alternada, então, pode acontecer, dependendo da frequência, que os elétrons se movam de um eletrodo para outro, enquanto o núcleo assume uma vibração entre um vai e volta de pequeno alcance.

Por sua vez, em complemento a ação de um campo elétrico, é importante recordar o efeito da temperatura sobre a estrutura molecular atômica. À medida que o calor sobe o diâmetro da nuvem de elétrons aumenta, enfraquecendo as ligações quânticas entre elétrons e núcleo. Agora, imaginemos uma situação em que, digamos um condutor de cobre, se encontra em um ambiente de alta temperatura e sobre ele incide um campo elétrico alternado. Os elétrons cairão na farrá fazendo avalanche entre uma direção e outra, enquanto os núcleos virtualmente nem se mexeram. Em complemento, desta vez imaginemos um dielétrico submetido às mesmas condições, os elétrons se polarizarão alternadamente sim, mas sem perder o elo quântico com seus núcleos, muito embora essa conexão quântica possa estar debilitada. Todavia, sob efeitos extremos de temperatura e/ou campo elétrico, essa ligação ou elo quântico pode ser rompido ocorrendo a soltura de um elétron, ocasião em que há uma liberação de energia considerável (perfuração do material) levando a carbonização ou mudança irreversível na estrutura molecular da matéria.

3.0 - COMPOSITO ISOLANTE TERMOFIXO MICA COM TRAMAS DE FIBRA DE VIDRO E EPOXI

A necessidade de criar um material que, além de possuir qualidades isolantes, fosse também acessível e trabalhável, ainda é a aspiração de todo engenheiro que se dedica a sistemas de isolamento de máquinas elétricas.

Para a década de 1950 a mica já tinha se consolidado como ingrediente isolante de base. Para aquele momento histórico, o asfalto era o material de impregnação de mais sucesso. Fundamentando, inclusive, a base do processo que hoje conhecemos como VPI-*Vacuum Pressure Impregnation*. Esse sistema termoplástico, apresentou excelentes resultados, tanto, que ainda podem ser encontrados geradores operando normalmente. A restrição a esse sistema, além das dificuldades naturais de se trabalhar com asfalto carregado de enxofre, era a sua classe de temperatura (Classe B ou 130° C) que ficou aquém das expectativas advindas com as aspirações de construir geradores com maior capacidade de potência por unidade.

Em resposta a essa pujança por novas e maiores centrais de geração de energia elétrica, depois da 2ª guerra mundial surgiram os materiais de impregnação sintéticos, tendo a mica sempre como base. Assim, na década de 1940 surgiu o Thermalastic da Westinghouse, que empregava o poliéster como base para a impregnação em VPI. Uma década depois a General Electric, a pioneira em adotar o asfalto, introduz o epóxi como uma resina polimérica de impregnação [CITATION Bou04 \l 1046].

Tudo indica que foi no início de 1960 que os grandes fabricantes globais de máquinas elétricas rotativas conseguiram estabilizar um processo VPI a base de epóxi que é utilizado até hoje.

O grande fator limitante era modular a temperatura de transição vítrea para que ela coincidisse com a faixa de temperatura de operação predominante da máquina. Isso foi conseguido com um *blend epóxi-poliéster*.

Atualmente, os mesmos benefícios daquele *blend* podem ser conseguidos formulando *blends* de epóxi, incrementando a sua capacidade de enfrentar ciclos térmicos severos como os encontrados nas modernas unidades reversíveis consorciadas na operação com fontes renováveis de origem eólica ou solar.

Assim, a consequência natural desse processo evolutivo foi a redução da parede isolante das barras ou bobinas, promovendo um crescimento da rigidez dielétrica, desde 0,75 kV/mm no início do século XX, até 3,5 kV/mm nos modernos sistemas de hoje. A Figura 3 ilustra a evolução dimensional da isolação principal a longo dos últimos 100 anos [CITATION Sum \l 1046].

Atualmente, o sistema de isolação mais bem aceito na comunidade de fabricantes de grandes geradores é um compósito formado por mica, fibra de vidro e resina epóxi-poliéster. O desenvolvimento da aplicação da mica indica ter chegado numa condição madura de utilização sob a forma de *fitas de mica*. Trata-se de um papel de mica depositado sobre uma gaze de fibra de vidro, suavemente aderidas entre si por um pouco de resina. As fitas de aplicação em VPI onde o acelerador da cura se encontra na própria resina, em geral têm 0,16mm de espessura e apresentam uma composição média de 80% de papel de mica, 10% de fibra de vidro e 5% de resina. Já, para a aplicação VPI onde o acelerador se encontra na fita de mica, tem-se uma espessura típica de 0,15mm e em peso consta: 81% de papel de mica; 12% de gaze de fibra de vidro, 5% de resina e 2% de acelerados da cura.

Por sua vez, o compósito curado apresenta uma composição clássica em torno de 27% de resina em amostras retiradas da região da parte reta da barra e em torno de 30% nas amostras retiradas da região das cabeças.

Dentre todos os três materiais a mica é o dielétrico por excelência, a fibra de vidro desempenha uma função estrutural. Já o polímero tem uma função aglutinante de preencher todos os espaços formando um compósito contínuo com estrutura termofixa monolítica. Ocorre que, justamente devido a sua estrutura molecular complexa, esse polímero constitui o “calcanhar de Aquiles” dessa excelente solução.

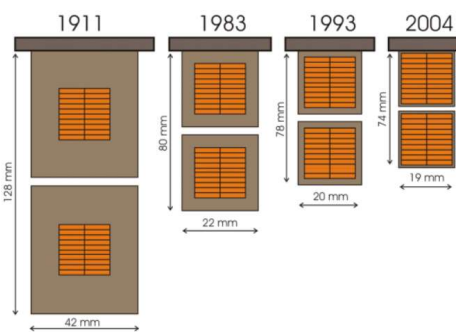


Figura 3 – Evolução dimensional da isolação principal [CITATION Sum \l 1046]

Nos próximos itens, trataremos da interação do compósito (leia-se a resina) com os diversos testes elétricos e térmicos que caracterizam os testes de aceitação de um sistema isolante estatístico tipicamente associado a geradores com tensões superiores a 13,8 kV.

3.1 A Temperatura de Transição Vítrea (Tg)

A transição vítrea é um dos métodos mais importantes para caracterizar uma propriedade específica de um material polimérico puro ou sob a forma de um compósito. A temperatura de transição vítrea é aquela em que o polímero ou compósito passa de um estado vítreo para um outro muito semelhante ao de uma borracha. A melhor maneira de imaginar esse tipo de transição é colocar um elástico em um recipiente de nitrogênio líquido. Quando removido, o mesmo estará num estado sólido e inflexível, vítreo, e na verdade o elástico nesse estado pode até ser despedaçado com um impacto. Em pé e aquecendo à temperatura ambiente, o elástico voltará a sua condição flexível. A temperatura em que o elástico começa a transição para o estado flexível se denomina de temperatura de transição vítrea.

Há três maneiras populares de se medir a Tg: a DSC -*Differential Scanning Calorimetry*- ou Calorimetria Diferencial de Varredura; a TMA -*Thermo-Mechanical Analysis*- ou Análise Termomecânica; e a DMA -*Dynamic Mechanical Analysis* ou Análise Dinâmico Mecânica.

A DSC define a Tg como uma mudança na capacidade térmica com que uma matriz polimérica vai do estado vítreo para o estado plástico. Trata-se de uma transição endotérmica de segunda ordem (requer calor para passar pela transição), de modo que na DSC a transição aparece como um degrau de transição e não como um pico.

A TMA define a Tg como uma consequência da mudança do coeficiente de expansão térmica enquanto o polímero sai da condição vítrea para a plástica associada a uma alteração no seu volume molecular livre.

A DMA consiste na avaliação dos módulos de perda ou armazenamento, elástico, de compressão ou de cisalhamento em função da temperatura quando a amostra é submetida a um programa de temperatura. Em materiais poliméricos, além da temperatura de transição vítrea, pode-se avaliar o comportamento mecânico em função da temperatura. Este equipamento é significativamente mais preciso que a Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) para avaliação de temperaturas de transição vítrea e, por isso, é utilizado para avaliar a compatibilidade entre misturas poliméricas e transições de grupos laterais ou extremidades de cadeias que são transições que envolvem uma quantidade de energia menor que a transição vítrea e não são detectadas pela técnica de DSC.

Na Figura 4 se apresentam duas medidas de um compósito típico correspondente a amostras da parede isolante retiradas da parte reta de duas barras Roebel, a primeira Figura 4(a) é uma amostra de uma barra virgem recém saída da estufa de curada; a outra Figura 4(b) corresponde a uma amostra da mesma região de uma outra barra do mesmo lote da anterior, porém, depois de passar pelos testes de ciclo térmico e VET.

Todavia, a grande importância que caracteriza a região de transição vítrea (linhas tracejadas em vermelho na Figura 4) radica na propriedade intrínseca de que se a temperatura do compósito se mantiver dentro da região de transição, o polímero não sofrerá alteração de fase e conservará as suas propriedades vítreas quando a temperatura resfriar, com a grande virtude que, enquanto estiver na região de transição, o polímero estará numa condição plástica que permitirá absorver deformações impostas pela expansão volumétrica do cobre, sem por isso introduzir fraturas no compósito que de outro modo seriam inevitáveis. Há que se lembrar que o coeficiente de expansão volumétrica do cobre é de quase 25 vezes ao do compósito isolante para mesma variação de temperatura.

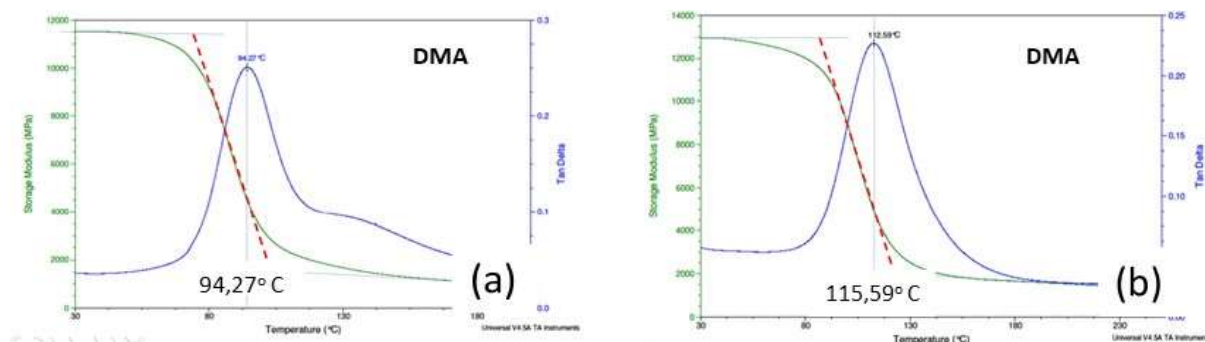


Figura 4 – Temperaturas de Tg obtidas por DMA de amostras da parte reta de barras de um mesmo lote, (a) compósito virgem; (b) depois de passar pelos testes de ciclo térmico e VET.

3.2 Propriedades dielétricas do compósito mica fibra de vidro e epóxi

Muito embora o termo *isolante* denomine um material com baixa condução elétrica, o termo *dielétrico* tipicamente caracteriza um material com alta polarizabilidade, expresso pela sua permissividade relativa. Desse modo, o termo isolante é usado para significar obstrução elétrica, enquanto o termo dielétrico é usado para indicar a capacidade de armazenamento de energia do material por meio da polarização. Assim, um dielétrico perfeito seria um material que apresente uma condutividade elétrica zero exibindo apenas uma corrente de deslocamento; portanto armazena e retorna energia elétrica como se fosse um capacitor ideal.

Nesse contexto, a *susceptibilidade elétrica de um dielétrico* é uma medida da facilidade/dificuldade com que esse material se polariza sob ação de um campo elétrico que, por sua vez, determina a *permissividade do material* ϵ (define a capacitância em função da sua geometria $C = \epsilon \cdot A/d$).

Ainda, ao inverter a polaridade do campo elétrico incidindo sobre um dielétrico -mudança na direção da polarização na Figura 2(b)- ocorre um atraso momentâneo na permissividade do material, causado normalmente pelo atraso na polarização molecular devido a um campo elétrico alternado. A esse atraso se denomina de *relaxamento do dielétrico* que pode ser considerado análogo à histerese dos ferromagnéticos na mudança de sentido dos campos magnéticos.

3.3 Fator de potência do compósito como dielétrico e inclinação do fator de potência [CITATION IEE \l 1046]

O circuito equivalente da parede isolante de uma barra Roebel pode ser representado tanto como um circuito série ou como um arranjo paralelo de componentes passivos, segundo representado na Figura 5. O isolante é representado por um capacitor ideal sem perdas e, as perdas dielétricas são representadas por um resistor.

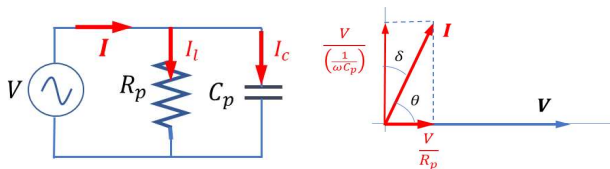


Figura 5(a) – Equivalente paralelo

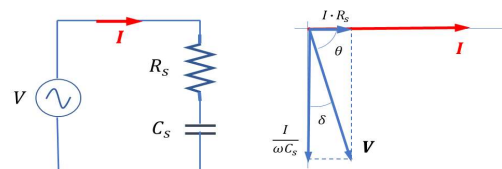


Figura 5(b) – Equivalente série

Ocorre que descrevendo o mesmo fenômeno concorrem os conceitos de: a) fator de potência e inclinação do fator de potência -*power factor tip-up* e b) fator de dissipação e o *delta tangente delta* ($\Delta \tan \delta$). Embora os processos para observar o fenômeno sejam diferentes, numericamente eles apresentam valores muito semelhantes,

3.3.1 O fator de dissipação dielétrica (FD) - $\tan \delta$

Segundo o modelo equivalente na Figura 5(a) é possível distinguir duas correntes de naturezas distintas. As mesmas se encontram ilustradas na Figura 6, sob a forma de perdas associadas ao fator de dissipação:

- $I_c = V / (1 / \omega C_p)$ representado a corrente capacitiva consequente da absorção dielétrica e condutividade. Considerando que o teste consiste em polarizar o compósito com uma tensão alternada de frequência industrial, em degraus de 0,2 pu até 1,2 pu, fica evidente o processo de polarização e relaxamento do dielétrico (compósito) ocasionando uma absorção dielétrica (energia gasta para mover a última camada de elétrons na frequência industrial toda vez que muda o sinal da tensão);
- $I_l = V / R_p$ em complemento, como o compósito não é ideal, ocorrerá uma dissipação por condução; sendo uma mínima parte representando a não idealidade da matéria e, outra parte dominante representando a ionização das bolhas de ar inerentes ao processo de produção (Figura 7).

Assim, propõe-se uma maneira de ponderar a relação entre a corrente de perdas e a corrente capacitiva. Para isso nos apoiaremos na Figura 5(a):

$$\frac{I_l}{I_c} = \frac{\frac{V}{R_p}}{\frac{V}{\frac{1}{\omega C_p}}} = \frac{X_p}{R_p} = \tan \delta \rightarrow \text{Fator de dissipação dielétrica} \quad (2)$$

Donde fica evidente que a $\tan \delta$, também chamado de fator de dissipação dielétrica, oferece uma visão do que acontece a nível atômico (polarização e relaxamento) em conjunto com as consequências de uma atividade macro promovido pela ionização das bolhas de ar, Figura 7.

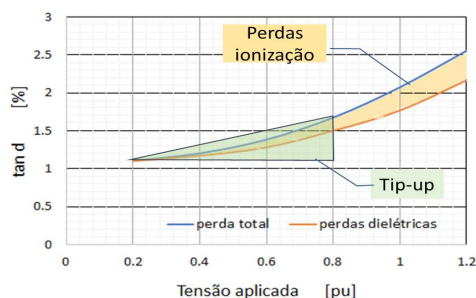


Figura 6 – Fator de dissipação

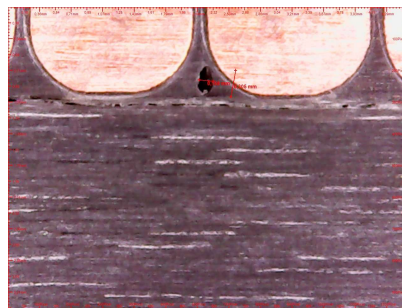


Figura 7 – Bolha inerente ao processo de produção

3.3.2 O fator de potência dielétrico (FP) - $\cos \theta$

Uma outra maneira de se observar a atividade dielétrica é comparar a quantidade de potência dissipada no compósito com o total de potência aparente aplicada. O conceito é clássico, muito semelhante à rotina de se avaliar o fator de potência de uma instalação.

$$\frac{P}{S} = \frac{\frac{V^2}{R_p}}{V \cdot I} = \frac{Z}{R_p} = \cos \theta = \sin \delta \rightarrow \text{Fator de potência dielétrica} \quad (3)$$

É importante notar que, se no FD cotejamos os efeitos da reatância capacitiva X_p com a resistência do dielétrico R_p , ao avaliarmos o FP estaremos comparando a impedância do compósito Z com a resistência do mesmo.

Finalmente, podemos enunciar que em ambos os métodos *estamos cotejando a condição dielétrica do compósito contra a sua capacidade isolante de bloquear a passagem de corrente*. Ou seja, quanto mais perfeito for o compósito na sua capacidade isolante, mais ele bloqueará a condução de corrente I , significando que a resistência R_p crescerá para valores elevadíssimos, levando tanto o FP como o FD para zero.

Por esse motivo, o FD a 0,2 pu de tensão nominal adquiriu relevância pois ajuda a determinar o estado da polimerização do compósito. Se a cura de um determinado isolante foi adequada, o valor inicial é normalmente consistente com os seus valores históricos. O incremento do FD com a aumento da tensão indica uma intensificação das descargas parciais dentro das bolhas do compósito (Figura 7). Muitos são os fatores que afetam o incremento do FD: podem ser delaminações entre as camadas de mica; descolamento do compósito na região de interfase com o cobre; uma impregnação imperfeita; cura inadequada; rugas no enfitamento da mica; e contaminações. O tratamento superficial anti-corona também influencia determinadamente o FD [CITATION Eme04 \l 1046].

Uma maneira efetiva e complementar de se avaliar a condição do sistema isolante consiste em observar a rampa de subida do FD. Isso normalmente é feito escolhendo dois pontos: o valor inicial e o correspondente mais próximo à da tensão entre fase e neutro 0,8pu (*tip-up* = $0,8 U_r - 0,2 U_r$). Esse método é referendado em [CITATION IEE \l 1046] como *power factor tip-up* (numa tradução livre: inclinação do fator de potência), fazendo referência à Figura 8, um compósito que se aproxime do ideal, em termos de manufatura, apresentará uma inclinação leve ou quase uma reta estável do $\tan \delta$, de modo que o $\Delta \tan \delta$ forme uma reta horizontal ou com alguma inclinação para baixo, significando que a atividade de ionização do ar vai mermando à medida que se incrementa a tensão aplicada.

Quando por algum motivo o *tip-up* apresenta um valor negativo é um indicativo de que a atividade de ionização do ar no interior do compósito mitigou, reduzindo a corrente de condução.

Falamos que a temperatura é um fator importante que age expandindo o diâmetro da órbita dos elétrons logo, isso implica diretamente na polarização e relaxamento do compósito. Portanto, os reflexos do efeito da temperatura também deveriam ser observados ao se medir o fator de dissipação; afinal, a reação dielétrica é dominante sobre a ação isolante.

Tip – up Máx $\leq 0.40\%$

Figura 8 – Medidas de FD de uma barra Roebel isolada para 18 kV e gráfico de tendência.

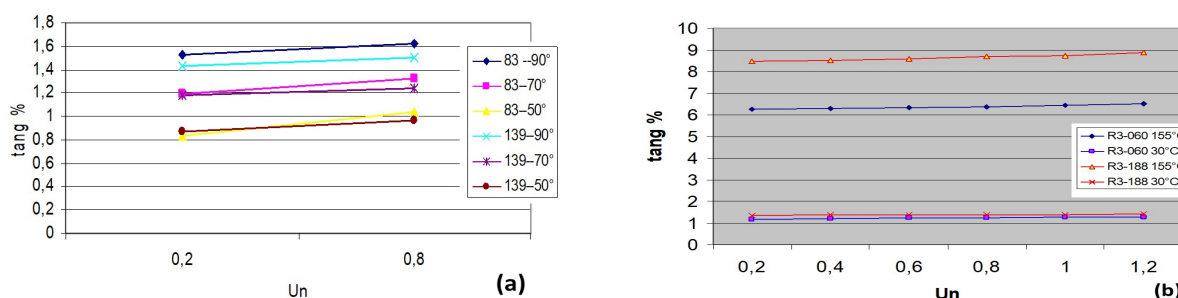


Figura 9 – Ilustração dos efeitos da temperatura sobre o fator de dissipação dielétrica

Embora não seja objetivo deste IT, o sistema de proteção anti-corona deverá ser cuidadosamente avaliado antes de se submeter as amostras às provas de envelhecimento acelerado.

4.2 Ensaio de tipo

Estes são os especificados quando se quer conhecer em maior profundidade o sistema de isolamento. Geralmente, associados a confirmar uma expectativa de vida, eles tentam emular os fatores TEAM – Térmico-Elétrico-Ambiental-Mecânico que afetam a longevidade do sistema isolante. Destacam-se, na sequência, a prova de endurância térmica -*thermal cycle endurance test*; prova de endurância elétrica -*voltage endurance test* e verificação da tensão de ruptura -*insulation breakdown test*.

4.2.1 Endurância térmica – *Thermal cycle endurance test*

Recordemos que o coeficiente de dilatação térmica linear do cobre é de $17 \times 10^{-6} [\text{m}/(\text{m K})]$ e que o do compósito isolante se encontra na ordem de $0,70 \times 10^{-6} [\text{m}/(\text{m K})]$ perpendicular às camadas de fita. Assumindo que 40°C seja o patamar inferior de temperatura operacional e que a cura do isolante das barras Roebel coincida com os 120°C da temperatura típica de operação de um gerador síncrono convencional, então o cobre sofrerá uma variação de 1,36 mm tanto na largura como na altura da barra. Ou seja, durante a cura, a polimerização do compósito ocorre quando o cobre está numa condição de dilatação volumétrica equivalente àquela que ocorrerá quando a máquina estiver operando a 120°C (Classe B de elevação de temperatura). Nessa situação de operação de regime permanente há um equilíbrio de forças mecânicas entre o cobre e o compósito isolante. Todavia, essa condição muda radicalmente quando ocorrem variações na temperatura do cobre.

Na condição mais comum, vejamos o que ocorre quando a máquina para e é mantida a 40°C pelas resistências de aquecimento, o cobre sofrerá uma contração linear de 1,36mm, enquanto a isolamento apenas encolherá de 0,56 mm. Ou seja, a aderência da resina imporá forças de descolamento, tracionando perpendicularmente as camadas de fita de mica. No caso extremo, digamos que o cobre aquece a 155°C , isto é 35K acima da temperatura de cura, que provocaria uma dilatação linear de 0,6 mm contra apenas 0,025 mm do involucro isolante. Logo, a expansão do cobre imporá forças que rachariam as paredes do compósito, se não fosse pela condição “plástica” adquirida na região da temperatura de transição vítrea (Figura 4).

Foi justamente com a missão de reprisar esses extremos críticos que foi imaginado o teste de endurância térmica. Assim, com uma sequência de aquecimento e resfriamento, esta prova tem se consolidado como uma das mais efetivas para avaliar a qualidade da formação do compósito resultante da polimerização da resina. Nessa prova, um conjunto de barras é acomodado sobre um *plenum* sugerido na IEEE Std 1310 [CITATION IEE12 \l 1046] as barras são aquecidas por circulação de corrente CA controlada e resfriadas pela ação de ventiladores estrategicamente controlados. A temperatura é conduzida de 40°C a 155°C num período médio de 92 minutos, submetendo as barras a 500 desses ciclos. Sendo que a 50, 100, 250 e 500 ciclos deverão ser medidas grandezas dielétricas típicas ($\tan \delta$ e seus associados) comparando-as com os resultados de uma barra virgem do mesmo lote. Nesse exercício, inclui-se o teste de percussão -*tapping test*- para detectar possíveis descolamentos/delaminações do isolante.

Finalmente, a própria IEEE Std 1310 sugere dois métodos para confirmar que as barras passaram no teste: a) a prova de endurância térmica -*Voltage endurance test* e; b) o teste de verificação da tensão de ruptura -*insulation breakdown test*.

4.2.2 Endurância elétrica – *Voltage endurance test*

Enquanto no teste anterior era observada a degradação dielétrica consequente de dois fatores aceleradores de envelhecimento (térmico e mecânico) agindo sobre o compósito, no presente teste, o objetivo é observar o comportamento do dielétrico sob ação de um campo elétrico alternado agindo quando as barras se encontram aquecidas. Isto é, queremos saber como reage o compósito sob ações de polarização e relaxamento, numa frequência de 60 ou 50 Hz quando as órbitas dos elétrons se encontram expandidas sob ação da temperatura.

Este teste é abrigado por duas normas, a IEEE 1043 [CITATION IEE96 \l 1046] que recomenda os procedimentos e a IEEE Std 1553 [CITATION IEE02 \l 1046] que discorre sobre os parâmetros e critérios de aceitação. Baseando-se na tensão nominal se prevê duas possibilidades de teste: a) maior tempo (400 horas) e menor tensão e b) menor tempo (250 horas) e maior tensão. Assim, para uma tensão nominal de 13,8 kV, têm-se duas possibilidades: a) 400 horas a 30 kV ou b) 250 horas a 35 kV. Em ambos os casos, os espécimes têm que ser mantidos na temperatura máxima de operação garantida medida pelos RTD's do enrolamento.

O critério de aceitação está alicerçado sobre o percentual de falhas da população: a) se nenhuma falhou, todo o lote está aprovado; b) sobre 4 barras, se um dos espécimes falhou após a metade do tempo previsto, então a mesma deve ser substituída por mais duas, todos os espécimes deverão passar na prova para ter o lote aprovado e c) sobre uma amostra de 6 barras, se apenas uma falhar e todas passarem o teste, o lote está aprovado.

Quando as barras que passaram pelo ciclo térmico são submetidas à prova de endurância térmica, tem que se ter a consciência que se tratam de espécimes fragilizados, alguns deles com descolamentos/delaminações, que ainda passarão por uma prova onde a robustez dielétrica será avaliada ao extremo, com o agravante de que as barras estarão à temperatura máxima de operação medida por meio dos RTD's. no caso de 13,8 kV, por norma 103° C.

Nos níveis de tensão praticados neste teste se espera uma atividade intensa de descargas parciais, principalmente se tiverem acontecido descolamentos/delaminações. O resultado dessa atividade poderá ser percebido durante a dissecação pela mudança de cor da mica que normalmente se apresenta numa cor bege pálida, passará para uma cor levemente caramelizada. Todavia, é muito comum que essa condição pós VET não afete a sua condição isolante de resistir a elevados níveis de tensão durante o teste de perfuração.

4.2.3 Ensaio de tensão de ruptura do material isolante – *Insulation Breakdown voltage test*

Finalmente, esta prova caracteriza a condição isolante do compósito, mesmo após ter sido submetido aos testes de envelhecimento elétrico e mecânico. Tem que se remarcar que neste teste a rigidez dielétrica do compósito é apenas um ingrediente entre outros, em que talvez tão importante quanto, seja a geometria da seção da barra, sem entrar no mérito da qualidade e zelo na manufatura da isolamento.

A tensão mínima de aceitação é de 4xUr, não sendo raro encontrar sistemas de isolamento, em que apesar das barras terem passado pelos testes de endurância térmica e elétrica, ainda suportem 7 a 8 vezes a tensão nominal.

5.0 - CONCLUSÃO

Tem-se apresentado os testes de rotina e aceitação dos sistemas isolantes de máquinas rotativas, principalmente os orientados a hidrogeradores de grande porte, visto sob a ótica da eletrodinâmica e suportada na ciência dos materiais.

Assim, os conceitos de polarização, permissividade e relaxamento têm sido abordados para entender o fator de dissipação e a sua correlação com o fator de potência. De modo que os conceitos de $\Delta \tan \delta$ e *tip-up* resultaram em uma ferramenta de avaliar o compósito como um dielétrico.

Fez-se questão de estabelecer uma diferença conceitual e semântica entre isolante e dielétrico; assim quando avaliamos um material isolante se considera sua propriedade de interromper corrente já, ao avaliar um dielétrico, estamos observando a sua habilidade de armazenar energia envolvendo as atividades de polarização e relaxamento da estrutura molecular da matéria. Nesse contexto, inclui-se o efeito da temperatura com a sua capacidade de expandir o volume orbital dos elétrons que, no caso dos dielétricos, tende a enfraquecer as suas ligações quânticas com o núcleo.

Para finalizar, abordam-se os testes de tipo mais populares, os de endurância térmica e elétrica, coroando com o teste de ruptura e, em cada um deles, propõe-se uma abordagem estrutural para explicar os mecanismos de envelhecimento/estresse presentes no processo. Nesse exercício, a eletrodinâmica e ciência dos materiais proporcionaram uma visão diferenciada dos mecanismos de envelhecimento acelerado próprio das provas de endurância elétrica e mecânica.

Esperamos que esta abordagem ofereça uma perspectiva diferenciada a quem estiver envolvido no cotidiano destes testes e que principalmente, tenha em mente que não se trata apenas de seguir um instrução, mas principalmente se trata de avaliar a extensão dos fenômenos envolvidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6.0 - H. Van Vlack, PRINCÍPIOS DE CIÊNCIA DOS MATERIAIS, São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1970.

[1]

[2] D. J. Griffiths, INTRODUCTION TO ELECTRODYNAMICS, Glenview - USA: Pearson Education, Inc., 2013.

- [3] E. A. Boulter e G. C. Stone, "Historical development of rotor and stator winding insulation materials and systems," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 20, No 3, pp. 25 - 39, May/June 2004.
- [4] C. Sumereder, "Statistical Lifetime of Hydro Generators and Failure Analysis," *IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vols. %1 de %215, No.3, pp. 678 - 685, June 2008.
- [5] IEEE Std 286, *IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation*.
- [6] F. T. Emery, "Basics of power factor measurements of high voltage bars & stator windings," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 20, No. 3, pp. 40 - 45, May/June 2004.
- [7] IEEE Std 1310, "IEEE Recommended Practice for Thermal Cycle Testing of Form-Wound Stator Bars and Coils for large Rotating Machines," 2012.
- [8] IEEE Std 1043, "IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils," 1996.
- [9] IEEE Std 1553, "IEEE Standard for Voltage Endurance Testing of Form-Wound Coils and Bars for Hydrogenerators," 2002.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



J. Johnny Rocha E. Nasceu em Cochabamba, Bolívia, 1959.

Engo. Eletricista pela PUC/RS em 1982; Me. Eng. Elétrica pela UFSC em 1985; Dr. em Sist. de Potência pela USP em 1996; MBA pela FGV em 2005 e Post Doc. na UNIFEI em 2018.

Como Prof. Universitário, trabalhou na PUC/RS e na UnB até 1990. Desde então tem se dedicado ao desenvolvimento teórico e prático de máquinas elétricas rotativas, com ênfase em hidrogeradores. Nesse âmbito, trabalhou para as grandes empresas do ramo: ABB; Siemens; Alstom e General Electric. Desde 2018 se encontra à frente da Trassinio Consultoria.

IEEE SM; CIGRE SC A1 Expert.