



CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE ISOLAÇÃO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES PARA A REALIZAÇÃO DE SERVIÇOS

Walter Evaldo Kuchenbecker

Pesquisador Doutor Colaborador do Programa de Pós-Graduação em ENERGIA – UFABC

walterk@weg.net

RESUMO

A manutenção frequente da máquina elétrica girante é vital para o seu perfeito funcionamento e esta responsabilidade é ainda maior em máquinas de grande porte, por causa dos altos valores agregados a essas máquinas e ao processo em que estão inseridas. As máquinas de grande porte, construídas com enrolamentos de média tensão, requerem tecnologias específicas e cuidados especiais na fabricação. Estes cuidados devem ser ainda mais específicos na operação e manutenção, pois estas máquinas elétricas são submetidas a severas condições de estresse elétrico, mecânico, térmico e ambiental. Uma manutenção periódica garante uma vida útil maior, pois pode identificar possíveis tendências incipientes de falhas. As ferramentas, equipamentos e experiências das equipes de manutenção podem identificar estas tendências de falhas, as causas e as respectivas correções. Para estas avaliações, os enrolamentos muitas vezes devem ser submetidos a níveis de tensão que também podem comprometer a atual situação da máquina, que já sofreu por muitos anos os estresses da operação. Assim, esse artigo tem como objetivo apresentar técnicas de avaliações em máquinas elétricas girantes, utilizando a tensão nominal de fase +10%, ou seja, os mesmos níveis de tensão aplicados aos enrolamentos em operação, uma proposição diferente do que é descrito nas normas.

Palavras chaves: Máquinas elétricas; isolação; manutenção.

1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas possuem papel fundamental em qualquer processo produtivo, tanto no quesito de força motriz quanto como fonte de energia. Assim, para qualquer parada de uma máquina elétrica, impactos significativos serão sentidos no processo produtivo.

Os altos índices de competitividade de mercado estão levando as indústrias a buscar confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos para minimizar interrupções indesejadas nos processos produtivos e para reduzir custos não programados de manutenção. Com base nisso, os setores de manutenção desempenham um papel fundamental, mediante estratégias na gestão de manutenção preventiva e preditiva. Em todo processo fabril existem equipamentos que estão em fase contínua de depreciação, ou até, a caminho de se tornarem obsoletos. A manutenção deve garantir a confiabilidade nos equipamentos durante todo o processo depreciativo [1].

A tradicional “curva da banheira” de falhas de equipamentos, conforme figura 1 [1], traduz a probabilidade de falhas em máquinas elétricas girantes. No início de operação, pode-se deparar com falhas inerentes à aplicação, ao transporte ou eventualmente à produção. Depois que se passa deste momento, o equipamento entra numa operação estável, podendo falhar randomicamente, e passado por este período, entra-se no limiar da vida útil. Para reduzir o número de falhas devido à produção, que ocorreriam após a instalação, diversos ensaios são realizados pelo fabricante antes do equipamento ser liberado. Estes não são ensaios adaptados para os outros momentos da vida útil do equipamento. O artigo se propõe a tratar das avaliações do sistema de isolação, quando a máquina elétrica estiver no último período da “curva da banheira”.

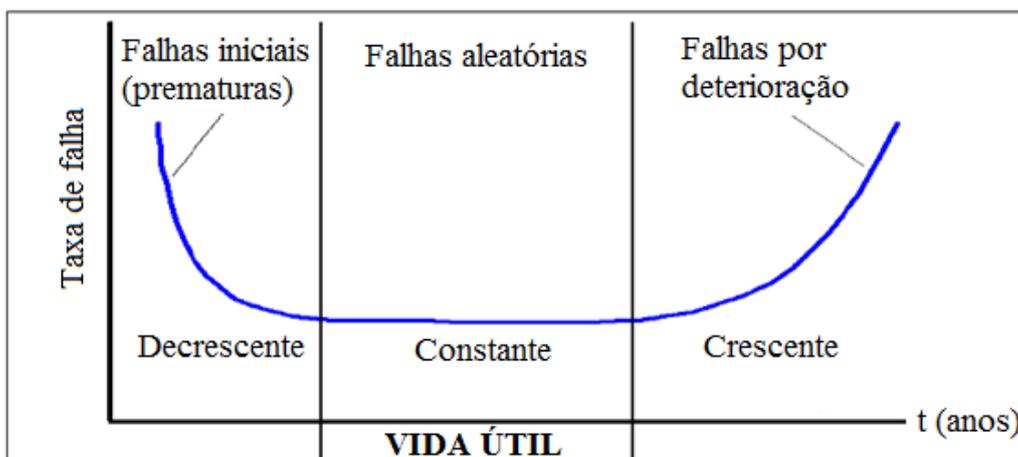


Figura 1: Tradicional “curva da banheira” para as probabilidades de falha durante a vida útil do equipamento [1]

As máquinas elétricas gigantes são submetidas continuamente a estresses elétricos, mecânicos, térmicos e ambientais, principalmente aos contaminantes que degradam os componentes da máquina e comprometem sua vida útil. O principal componente que é degradado numa máquina elétrica é o sistema de isolamento dos enrolamentos. Este fator é ainda mais complexo nas máquinas de média tensão. A figura 2 apresenta uma estatística de falhas em geradores de grande porte, onde se pode observar que as falhas referentes à isolamento são predominantes.

A vida útil dos isolantes, normalmente, define a confiabilidade de funcionamento da máquina elétrica. Uma máquina de boa qualidade e operando de maneira recomendada tem uma expectativa de vida útil em torno de 25 anos [2; 3]. A isolamento pode ser afetada por vários fatores, tais como: absorção de umidade, oxidação, decomposição térmica, efeitos eletrolíticos e correntes de fuga, descargas elétricas e suas reações químicas, estresses termomecânicos, desgaste mecânico e os abrasivos. Estes fatores podem acelerar degradações nos isolamentos e levar a máquina elétrica a falhas prematuras e inesperadas.

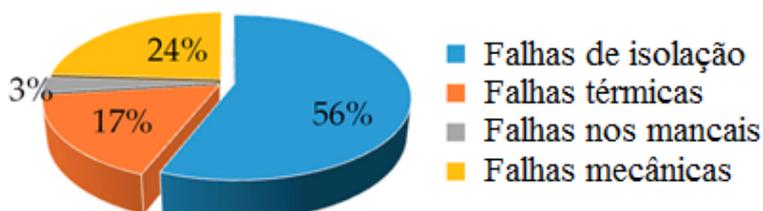


Figura 2: Estatísticas de falhas em geradores de grande porte e média tensão [2]

Estudos e equipamentos estão sendo constantemente desenvolvidos para monitorar tendências de falha. Os ensaios mais comuns utilizados nas avaliações destas máquinas elétricas são: a medição da resistência de isolamento, índice de absorção e polarização; teste de surto de tensão (*surge test*), que é utilizado para identificar curto entre espiras; os aplicadores de tensão (*hipots*) usados para testar os isolantes de maneira ativa, medindo a fuga de corrente e verificando o efeito corona; as perdas dielétricas (o tangente delta), que são usadas para identificar a tendência das perdas na capacitância associada à isolamento e o medidor de descargas parciais que monitora pequenas descargas que acontecem nestes sistemas de isolamento e traça uma evolução destes níveis.

O estator e o rotor de uma máquina elétrica são compostos basicamente por três tipos de materiais: os condutores de cobre (podendo ser de alumínio em alguns casos), o núcleo de chapas ferromagnéticas e os isolantes. Os condutores conduzem a corrente necessária para a criação do campo magnético e conversão de energia, o núcleo de chapas conduz o fluxo magnético e os isolantes separam as partes eletricamente ativas, garantindo que a corrente siga o caminho correto.



Os enrolamentos dos estatores podem ser fabricados de três maneiras: bobinagem randômica, utilizada para bobinas de alta capacidade de corrente com vários condutores em paralelo, comum em máquinas de tensão abaixo de 1kV (baixa tensão). As bobinas pré-formadas são normalmente utilizadas para máquinas com tensão acima de 1kV. As bobinas são moldadas e isoladas antes da inserção nas ranhuras da máquina. Todas as bobinas possuem o mesmo formato com separações entre cada bobina. As bobinas das máquinas acima de 50MW são de difícil inserção nas ranhuras devido ao seu grande tamanho, aumentando a probabilidade de danos no processo de bobinagem. Este processo é facilitado pela inserção de enrolamentos de barras do tipo Roebel. Nesses enrolamentos, existem conexões nos dois lados das barras para a formação da espira.

O sistema de isolamento de um enrolamento da máquina elétrica contém vários componentes, os quais evitam que a parte ativa entre em curto circuito. Os componentes básicos de um sistema de isolamento são: isolamento entre os fios, isolamento entre espiras e isolamento para terra. O projeto da isolamento deve levar em consideração a vibração originada pelas forças eletromagnéticas e a dificuldade extra que causam ao resfriamento dos enrolamentos.

As máquinas elétricas de média tensão utilizam normalmente a ligação estrela com o neutro acessível para a alimentação do estator. Quando a máquina possui esta ligação, a composição da tensão de linha se dá pela soma vetorial das duas tensões de fase. Já no caso da ligação triângulo, a tensão de fase é exatamente a mesma da tensão de linha e a corrente de linha se dá pela somatória vetorial das correntes de fase. Assim há uma relação de 1,73 vezes (raiz quadrada de 3) entre as grandezas de linha e de fase em máquinas trifásicas.

O projeto do sistema de isolamento leva em consideração mais de um século de experiência dos fabricantes de equipamentos eletromagnéticos. Entretanto, os novos materiais e o uso da eletrônica de potência, ambos com alta taxa de atualização nas últimas décadas, exigem um contínuo aperfeiçoamento do conhecimento sobre o tema. As normas consideram as avaliações dos enrolamentos sempre com tensão de linha da máquina. A tensão aplicada no ensaio do “hipot” é normalizada em $2 \times U_{\text{Linha}} + 1\text{kV}$, valor este muito acima da tensão de linha da máquina. Esta alta tensão produz um estresse concentrado durante 1 minuto e só deve ser aplicado em máquinas novas.

Máquinas que operaram por muito tempo, e que ainda estão dentro da sua vida útil, submetidas às mais diversas condições de agressividade, podem estar com as propriedades dos isolantes modificadas, não cabendo nela este ensaio normalizado, pois o estresse concentrado deste ensaio pode envelhecer rapidamente o isolante, reduzindo sua vida útil [4].

A proposição deste artigo é manter os níveis de tensão de operação para as avaliações gerais dos sistemas de isolamento das máquinas a serem reparadas. Portanto, utilizar sempre $U_{\text{Linha}}/\sqrt{3} + 10\%$ para todos os ensaios recomendados para avaliar o equipamento. O acréscimo de 10% na tensão foi atribuído por causa da possibilidade de variação de tensão dos sistemas de fornecimento de energia elétrica.

2 CARACTERÍSTICAS DAS ISOLAÇÕES

2.1 Tipos de construção de estatores

Os estatores das máquinas elétricas de média tensão são compostos por bobinas pré-formadas, núcleo de chapas ferromagnéticas finas com baixas perdas e de alta permeabilidade e o sistema de isolamento. O isolamento para a massa é feito na própria bobina para as bobinas pré-formadas, diferente dos enrolamentos randômicos de baixa tensão em que o isolamento é feito por filmes isolantes dentro da ranhura, mas que não serão discutidos neste artigo.

Os fatores que definem um sistema de isolamento são as temperaturas de trabalho quando a máquina elétrica se encontra em regime, a tensão nominal, a resina utilizada na impregnação e o ambiente em que a máquina irá operar, bem como, a aplicação da máquina. Os enrolamentos com bobinas pré-formadas geralmente são aplicados para máquinas elétricas com potência acima de 1000kW e com tensão de linha normalmente superiores a 690V.

A figura 3 mostra um estator com bobinas pré-formadas, devidamente espaçadas, salientando como os fios retangulares estão dispostos dentro da ranhura.

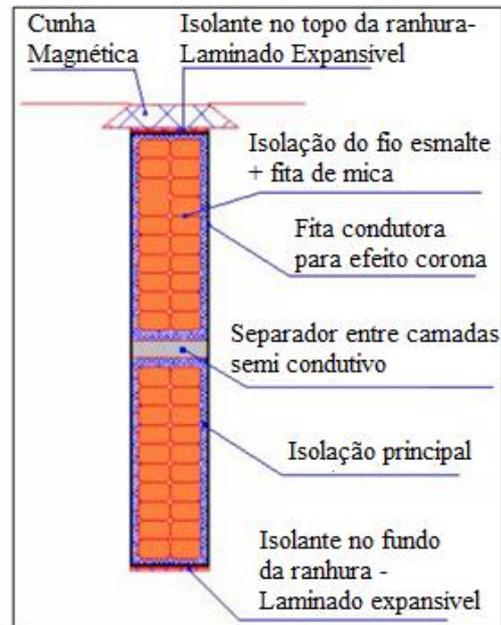
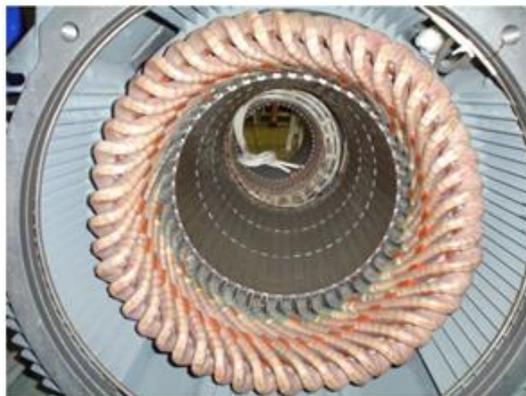


Figura 3: Estator com bobinas pré-formadas e ranhura com disposição dos condutores [13].

Os enrolamentos com bobinas pré-formadas são constituídos por fios retangulares, que podem ser isolados entre si em quatro maneiras diferentes, selecionados pelo nível de tensão desejado. Os fios retangulares podem ser revestidos por uma camada de esmalte à base de poliéster. Para tensões maiores, esta isolação é reforçada com uma ou duas camadas de fio isolante à base de fibra de vidro. Outra solução é uma camada de fita de mica com base de poliéster. Finalmente, a opção de isolação por uma camada de esmalte de poliéster e mais uma camada de fita de mica é a mais adequada para tensões mais altas. Estas composições possuem rigidez dielétricas na ordem de 70 a 100kV/mm [13]. Um sistema de isolação completo de uma bobina pré-formada para máquina elétrica de média tensão é mostrado na figura 4.

Após a finalização de todo o processo de isolação e formatação da bobina, as mesmas são inseridas nas ranhuras do núcleo de chapas magnéticas e travadas pelas cunhas de fechamento da ranhura. Com todo o núcleo ferromagnético bobinado, com as ligações das bobinas realizadas e os cabos de saída interligados, o núcleo bobinado é submetido ao sistema de impregnação a vácuo e pressão (VPI – *Vacuum and Pressure Impregnation*). Este processo consiste em emergir os enrolamentos em resina isolante sob pressão para eliminar qualquer possível bolha de ar. A cura da resina é feita em estufa aquecida, monitorando a temperatura dos enrolamentos. Quando os enrolamentos atingirem a temperatura específica, a máquina permanece na estufa por cerca de 12h para a cura. Após a cura, o processo de impregnação está completo.

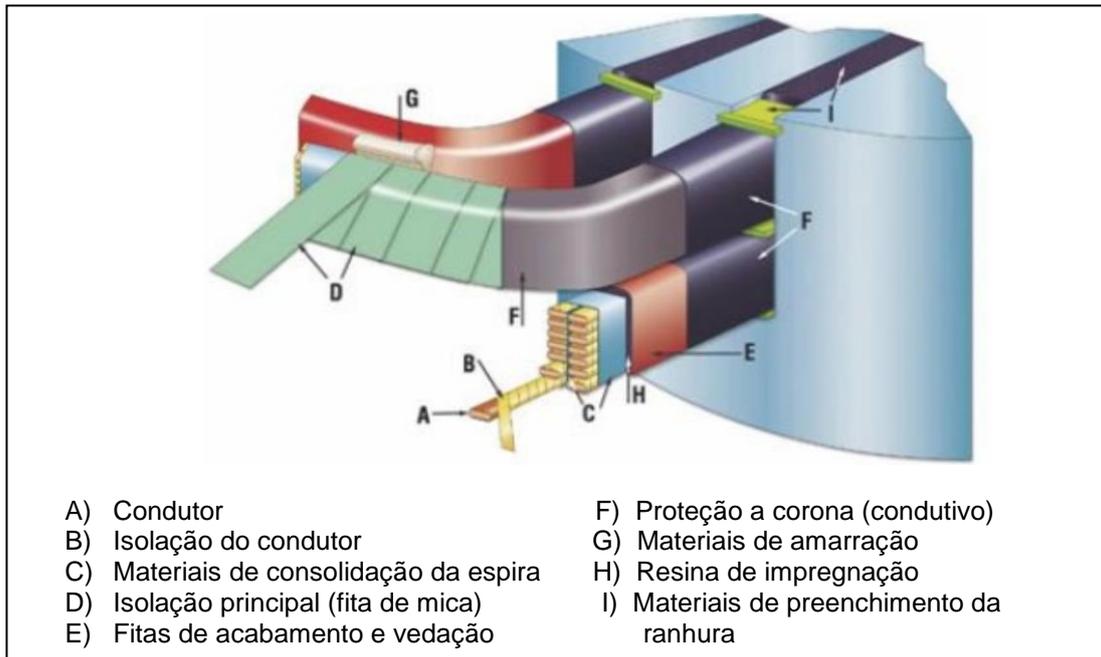


Figura 4: Sistema de isolamento para máquinas de média tensão [13]

Os problemas associados à falha de isolamento podem estar relacionados à movimentação das bobinas por causa da vibração, normalmente consequência de condições operacionais inadequadas. Estas vibrações reduzem a distância de isolamento, aumentando o estresse no dielétrico. As condições de carga ou altas variações dos ciclos de carga podem levar a deformações e fissuras no material isolante. Para os ambientes contaminados, instalação e manutenção, as descargas são ocasionadas na superfície do isolamento por partículas condutoras (poeira, contaminação por água, óleo, etc...). Limpezas periódicas e processos adequados de manutenção podem minimizar os efeitos dos contaminantes.

3 AVALIAÇÕES E TESTES NOS SISTEMAS DE ISOLAÇÃO

Com o passar do tempo e sob os estresses submetidos na operação, o sistema de isolamento sofre alteração de suas propriedades, causando um envelhecimento natural ou mesmo acelerado. Isto faz com que os isolantes diminuam sua capacidade dielétrica e tendam a uma falha. Estas falhas podem acontecer no meio de importantes processos nos quais a máquina elétrica está inserida. Estes eventos indesejados podem ser minimizados com revisões preventivas periódicas, onde especialistas utilizam técnicas de avaliações de tendência e possíveis fragilidades nos sistemas de isolamento. Para isso, técnicas de avaliações normalizadas podem ser aplicadas ou até medições específicas que mostram esta tendência.

As principais avaliações consideradas são: resistência de isolamento, índice de absorção e índice de polarização, teste de surto de tensão, tensão aplicada, corona visual, perdas dielétricas (tangente delta) e descargas parciais. O ensaio da medição da resistência de isolamento nas máquinas elétricas é utilizado para identificar danos no sistema de isolamento que produzem curtos circuitos francos ou uma redução na resistência de isolamento, comparada à resistência de máquinas do mesmo tipo em boas condições ou com uma medição anterior. Os índices de absorção e polarização estão relacionados às leituras de 30 segundos e 10 minutos da isolamento.

O ensaio de tensão aplicada (*hipot*) visa avaliar a capacidade dielétrica do sistema de isolamento para suportar os estresses submetidos à máquina elétrica em operação. Se o sistema de isolamento suportar o teste de *hipot*, significa que suportará os estresses submetidos em operação, com baixo risco. A figura 5 apresenta um exemplo de surto de manobra de um disjuntor a vácuo, ao qual o motor elétrico de 11kV de tensão nominal está sujeito. Ele chega a 36,2 kV (a escala do gráfico é de 10 kV por divisão).



Existem duas possibilidades para realizar os testes de tensão aplicada, em CA ou CC. O teste em CA é preferido, pois submete a isolamento de maneira similar à operação. Além disso, pode detectar melhor possíveis defeitos e é também utilizado em outros testes como corona visual, tangente delta e descargas parciais. As vantagens do teste CC é que o equipamento é mais barato e portátil, característica importante para os testes em campo por causa da mobilidade. Além disso, apresenta também a vantagem de um controle melhor para abortar o teste num diagnóstico ou tendência de falha. O teste normalizado em CA é aplicar $2 \times U_{\text{Linha}} + 1\text{kV}$ e no caso de CC é 70% maior que o de CA.

O efeito corona está presente em máquinas elétricas de média tensão (acima de 10kV). O efeito corona é causado pela ionização do gás que está adjacente aos enrolamentos com bobinas pré-formadas. Tal ionização é provocada pelo campo elétrico em torno dos condutores.

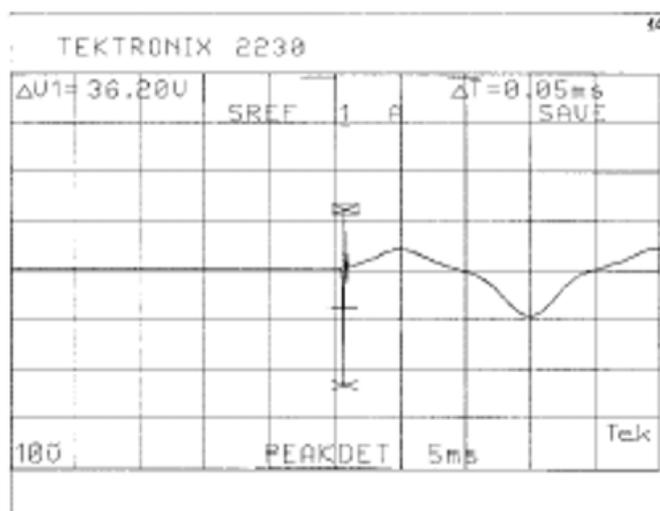


Figura 5: Exemplo de surtos de tensão ocasionados por manobras de disjuntores.

O teste de surto de tensão, conhecido como *surg test*, é realizado aplicando um breve surto de tensão na bobina, que responde por meio de uma forma de onda senoidal amortecida. A forma de onda que o instrumento apresenta está diretamente relacionada com a impedância da bobina, que apresenta uma característica própria e única.

Avaliações de isolamento dificilmente revelam o estado do isolamento por uma simples medição, uma vez que mudanças nas perdas dielétricas dependem do material das quais estas são constituídas, tamanho das máquinas, condições ambientais e operacionais. Entretanto, um acompanhamento de medições de tangente delta, também conhecido como fator de dissipação, mostra tendências ao longo do ciclo de vida da máquina elétrica que pode diagnosticar tendência de degradação do sistema de isolamento. O ensaio de tangente delta é utilizado também para a avaliação da qualidade da impregnação, secagem e cura do isolamento ao longo do processo de fabricação da máquina elétrica [5].

A tensão aplicada num sistema de isolamento submete os isolantes a uma diferença de potencial que se distribui em todo o enrolamento em relação à terra. Porém, vazios e cavidades existentes podem alterar o dielétrico, reduzindo a rigidez dielétrica pelos gases no interior destes. Estas faltas podem gerar pequenas centelhas de descargas parciais para o interior das bolhas, acarretando um processo progressivo de deterioração do material e eventual falha do isolamento. Estes vazios podem estar relacionados a processos de impregnação, secagem ou cura do enrolamento, ou também pelo envelhecimento e microfissuras causados pela operação, principalmente sobre temperatura.

Estes testes, de forma geral, foram desenvolvidos para avaliar falhas no processo de fabricação e fornecem muitas informações importantes, entretanto provocam um estresse extra nos isolantes. Assim, sistemas de isolamento fragilizados por uma vida longa podem ser levados à falha durante os testes. Um exemplo de precipitação de fim de vida útil de um sistema de isolamento, que poderia operar por mais alguns anos, está mostrado no próximo parágrafo.



Durante o teste da tensão aplicada, o enrolamento todo (entre o início e final do enrolamento) fica submetido à mesma diferença de potencial em relação à terra, conforme figura 6 (b). Por outro lado, na condição de funcionamento normal, o nível de tensão a que estão submetidas as bobinas nas proximidades do ponto neutro é menor do que na saída da fase, conforme mostrado na figura 6 (a) [6].

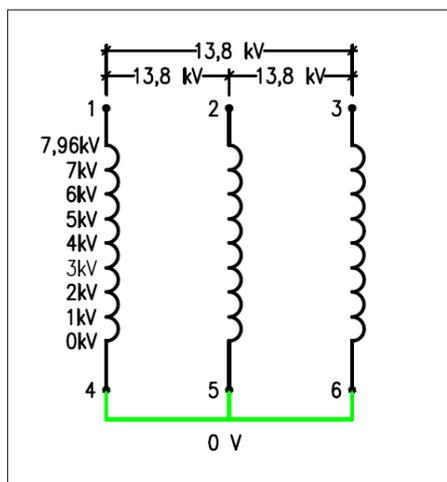


Figura 6 (a)

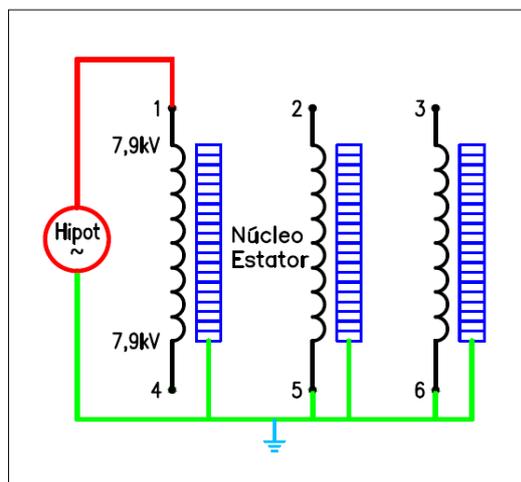


Figura 6 (b)

Figura 6: (a) Exemplo ilustrativo da distribuição da tensão nos enrolamentos, quando o equipamento está em operação. (b) Exemplo ilustrativo de um enrolamento sendo submetido a um ensaio de hipot

3.1 Resistência de isolamento e índice de polarização e absorção

Este ensaio é feito com tensões contínuas, com amplitude que depende da magnitude da tensão nominal da máquina a ser ensaiada. O megômetro é o instrumento típico para a realização deste ensaio. Os megômetros possuem escalas de 500 a 15.000V e os fatores de temperatura ambiente e a umidade relativa do ar influenciam fortemente as medições. Por isso, é muito importante sempre referenciar estes dois fatores ambientais com a medição.

Tabela 1: Guia para seleção de tensão CC para a medição de resistência de isolamento (IEEE43)

| Tensão Nominal (VCA) | Tensão de Teste CC. (VCC) |
|----------------------|---------------------------|
| < 1000 | 500 |
| 1000 – 2500 | 500 - 1000 |
| 2501 – 5000 | 1000 - 2500 |
| 5001 – 12000 | 2500 - 5000 |
| >12000 | 5000 - 10000 |

A corrente total que circula pelo isolamento é composta por três componentes: a corrente de fuga condutiva, a capacitiva e a de absorção de polarização. A corrente de fuga condutiva (I_L) é uma pequena quantidade de corrente (μA) que flui através do isolante. Esta corrente aumenta à medida que a isolação se deteriora. A corrente de fuga de carga capacitiva (I_C) acontece devido à proximidade dos condutores, através da isolação dos condutores. Esta corrente dura apenas alguns segundos, até que a isolação seja carregada com a tensão CC aplicada pelo instrumento. Finalmente, a corrente de fuga de absorção de polarização (I_a) é causada pelo deslocamento de cargas dentro do material dielétrico. Em equipamentos de baixa capacitância, a corrente é alta pelos primeiros poucos segundos e decresce vagarosamente a quase zero. Para equipamentos de alta capacitância ou isolação contaminada, não haverá decréscimo na corrente de absorção por um longo período, conforme figura 7, [14].

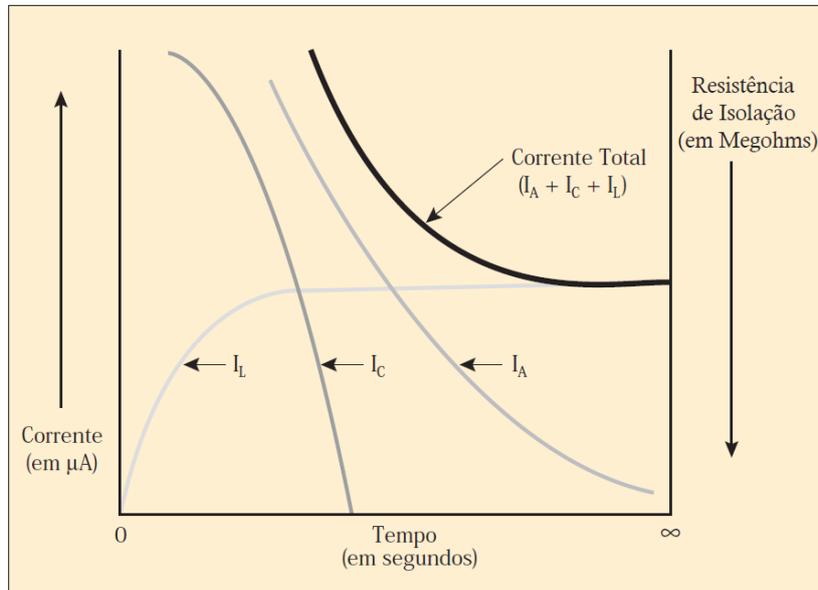


Figura 7: Decomposição da corrente total durante a medição da resistência de isolamento [14] (escala da esquerda do gráfico) e sua correspondente resistência de isolamento (escala à direita do gráfico, na unidade tipicamente mostrada pelo megômetro)

O valor de resistência de isolamento é medido em 1 minuto e corrigido para a temperatura de referência (40°C) pela equação 1, conforme IEEE43. O critério de aceitação é de 100MΩ para bobinas pré-formadas.

$$R_{\text{Iso}40^{\circ}\text{C}} = K_{40^{\circ}\text{C}} \cdot R_{\text{Medida}} \quad [1]$$

$$K_{40^{\circ}\text{C}} = (0,50)^{\frac{(40 - T_{\text{Medida}})}{10}}$$

Já os valores dos índices I_P e I_{Abs} são determinados pelas equações 2 e 3 e se faz necessária a medição de isolamento em 30 segundos e 10 minutos:

$$I_P = \frac{R_{10\text{Minutos}}}{R_{1\text{Minuto}}} \quad [2]$$

$$I_{\text{Abs}} = \frac{R_{1\text{Minuto}}}{R_{30\text{Segundos}}} \quad [3]$$

Tabela 2: Critérios de avaliação para a medição de resistência de isolamento (IEEE43)

| Índice de absorção | Índice de polarização | Avaliação do isolamento |
|--------------------|-----------------------|-------------------------|
| ---- | 1 ou menor | Ruim |
| Abaixo de 1,1 | <1,5 | Perigoso |
| 1,1 a 1,25 | 1,5 a 2,0 | Regular |
| 1,25 a 1,4 | 2,0 a 3,0 | Bom |
| 1,4 a 1,6 | 3,0 a 4,0 | Muito bom |
| Acima de 1,6 (1) | >4,0 | Ótimo |

O ensaio de medição da resistência isolamento não possui restrições, respeitando os valores indicados na tabela 1. Além disso, os instrumentos disponíveis no mercado têm tensão CC limitada em 15kV e, principalmente, potência insuficiente para manter uma fuga de corrente prejudicial ao enrolamento, reduzindo automaticamente a tensão aplicada.



3.2 Teste de surto de tensão

O teste de surto de tensão é fundamental para detectar curto entre espiras, mas também é possível identificar falhas como: curto circuito entre bobinas, curto circuito entre fases, ligações invertidas e número de espiras diferentes. O valor da indutância de uma bobina (medida em henry) é basicamente determinado pelo número de espiras, pelo formato da espira e pelas propriedades geométricas e físicas do núcleo da mesma. Quando a indutância diminui, a frequência da oscilação do circuito aumenta de acordo com a equação 4.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad [4]$$

A norma IEEE 522 item 6.2 informa o nível de tensão que deve ser utilizado para o ensaio, determinado pela equação 5.

$$V_2 = 3,5 \cdot \left[\left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right) \cdot V_{\text{Linha}} \right] \quad [5]$$

Nota: A partir das constantes da equação, pode-se considerar a mesma de forma resumida como: $2,85 \times U_{\text{Linha}}$.

Se a resistência do dielétrico não suportar a tensão V_2 , a isolamento será rompida e algumas espiras serão curto circuitadas, reduzindo a indutância e, portanto, aumentando a frequência, conforme equação 4. A mudança da forma de onda acontece quando a corrente (i) varia de acordo com o tempo do pulso (t). Quando a isolamento entre espiras é frágil, o resultado é uma oscilação de pequena amplitude deformada. Esta amplitude é determinada pela equação 6:

$$V = L \cdot \frac{di}{dt} \quad [6]$$

A medição pelo surge teste é de fácil controle, pois a rampa de subida da tensão que é aplicada é acompanhada e, qualquer tendência de ocorrência, o operador pode interromper o teste rapidamente. Porém, o nível de tensão recomendado pela norma pode submeter os isolantes a valores consideravelmente altos. Por exemplo, para uma máquina com tensão nominal de 13,8kV, a tensão recomendada pela norma para o ensaio de surge teste é 39,5kV. Para máquinas em campo, a norma IEEE522 sugere o valor de teste de $0,75 \times 2,85 \times 13,8\text{kV}$, que resulta em 29,5kV.

Para as avaliações de máquinas a serem reparadas e com possíveis isolamentos envelhecidas, a proposição é utilizar a tensão de fase +10%. Como se trata de um pulso de tensão tendendo a uma tensão contínua, multiplicar por 1,7. Por exemplo, para uma máquina de 13,8kV de tensão nominal, o valor a ser utilizado no teste é 14,91kV.

3.3 Tensão aplicada

Os testes com tensão aplicada são necessários para assegurar que os sistemas de isolamento possuam capacidade mínima de suportar os estresses submetidos durante a operação normal. Por exemplo, devem suportar os surtos (dV/dt's) de manobras dos disjuntores como o mostrado na figura 5.

O teste para uma máquina nova ou rebobinada consiste em aplicar uma tensão alternada de $2 \times U_{\text{Linha}} + 1\text{kV}$ (Exemplo: para uma máquina de 13,8kV, será aplicado 28,6kV). Para uma máquina em serviço, a norma IEC 60034-1 recomenda aplicar $U_{\text{Linha}} \times 1,5$ (Exemplo: para uma máquina de 13,8kV, será aplicado 20,7kV). Para aplicar tensão contínua, multiplicar os valores de tensão alternada por 1,7. Para ambos os casos, a isolamento deve suportar este nível de tensão durante 1 minuto.



Basicamente, o critério de aceitação é do tipo passa ou não passa (falha). Portanto, a princípio, um sistema de isolamento que falha neste teste, pode-se considerar que falharia num curto período de operação. Sua função é reduzir a taxa de mortalidade característica da fase inicial da curva da banheira. A experiência mostra que vários pontos fragilizados no sistema de isolamento são evidenciados pelo *hipot*.

Para máquinas elétricas com longos períodos de operação, ou seja, com uma isolamento já estressada, o teste de *hipot* pode reduzir em alguns anos a vida útil do equipamento, levando a uma falha devido à aplicação de tensão em uma isolamento que não é nova. A decisão de realizar ou não este teste após uma revisão é sempre delicada, e deve ser tomada por qualquer fabricante ou empresa prestadora de serviços para reparos ou revisões baseadas nos critérios normalizados.

A proposição deste artigo é utilizar tensão de fase +10% para o *hipot*, pois desta maneira, faz-se uma avaliação do sistema de isolamento similar de quando a máquina elétrica está em operação, porém medindo a corrente de fuga do sistema de isolamento. Com base na figura 5, ainda pode existir uma possibilidade de falha no teste de *hipot*, mas com risco bastante reduzido.

Tabela 3: Níveis de tensão recomendados por norma e proposta do artigo

| Condições de isolamento | Nível de tensão Hipot CA | Nível de tensão Hipot CC |
|---------------------------------|------------------------------------|---|
| Máquinas novas (norma) | $2 \times U_{\text{Linha}} + 1000$ | $2 \times U_{\text{Linha}} + 1000 \times 1,7$ |
| Máquinas de reparo (norma) | $U_{\text{Linha}} \times 1,5$ | $U_{\text{Linha}} \times 1,5 \times 1,7$ |
| Máquinas de reparo (proposição) | $U_{\text{fase}} + 10\%$ | $(U_{\text{fase}} + 10\%) \times 1,7$ |

3.4 Corona visual (*Black-out test*)

O efeito corona tem origem da descarga elétrica pela ionização do gás entre bobinas ou a terra. O aspecto azulado acompanhado de ruído é característico do efeito que ioniza parcialmente o gás, com formação de ozônio. Este efeito deteriora o material isolante com correspondente diminuição da rigidez dielétrica do isolamento, levando a descargas elétricas que conduzem à posterior falha de isolamento.

Este ensaio é aplicável para máquinas com tensão acima de 10 kV. É realizado com $1,15 \times U_{\text{Linha}}$ (Exemplo: para uma máquina de 13,8kV, utiliza-se 15,87kV), conforme IEEE 1799. Este ensaio identifica pontos visuais de descargas elétricas entre bobinas. Estes pontos de corona, se não forem corrigidos, aceleram a deterioração dos isolantes.

A proposição para este teste também é aplicar 10% a mais da tensão de fase (Exemplo: para uma máquina de 13,8kV, utiliza-se 8,76kV), porém em dois enrolamentos, usando dois aplicadores de tensão defasados de 120° , conforme a figura 8 (b). Esta condição é exatamente a mesma da operação, conforme mostra a distribuição fasorial na figura 8 (a). Com este teste proposto, foi possível identificar em torno de 60 a 70% em relação ao mesmo teste, aplicando níveis de tensão sugeridos por norma (15,87kV para o exemplo de 13,8kV).

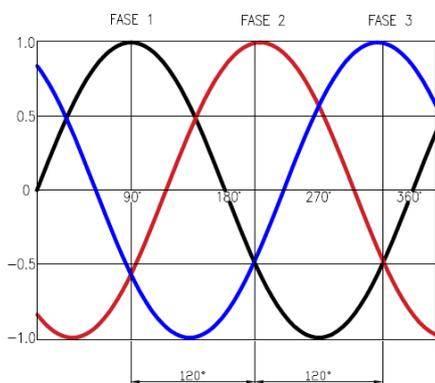


Figura 8 (a)

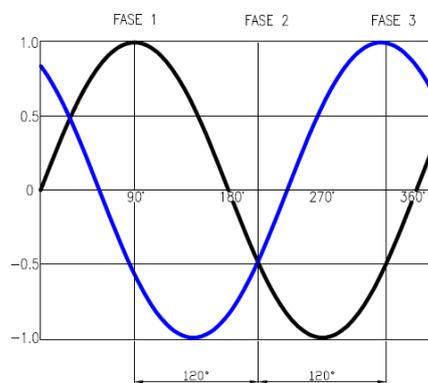


Figura 8 (b)

Figura 8: (a) Distribuição fasorial de um sistema trifásico de tensão. (b) Tensão aplicada em duas fases diferentes e aplicada por dois aplicadores de tensão defasados de 120°



3.5 Tangente delta

O ensaio de “tangente delta” também é aplicável para máquinas com tensão ≥ 6 kV. Ele é realizado com $1,2 \times U_{\text{Linha}}$ (Exemplo: Para uma máquina de 13,8kV, utiliza-se 16,56kV), conforme IEEE286. No ensaio, é realizado um comparativo da curva de perdas dielétricas padrão da norma com os valores medidos na máquina. Estes resultados apresentam tendências do possível comprometimento da isolação. Uma nova impregnação VPI, ou até o rebobinamento, podem ser recomendados para restabelecer os parâmetros.

O teste de tangente delta é baseado no fato de que todos os materiais isolantes possuem perdas dielétricas. Assim, um sistema de isolação pode ser modelado por um capacitor em paralelo com uma resistência que representa as perdas dielétricas. A partir deste modelo, as perdas podem ser calculadas pela equação 9. O diagrama fasorial das correntes que circulam nesse modelo está representado na figura 9.

$$P_{\text{Perdas}} = V \cdot I \cdot \cos\varphi = V \cdot I \cdot \text{sen}\delta \quad [7]$$

$$I \cdot \cos\delta = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot V \quad [8]$$

$$P_{\text{Perdas}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot V^2 \cdot \left(\frac{\text{sen}\delta}{\cos\delta} \right) \quad [9]$$

$$\tan\delta = \frac{P_{\text{Perdas}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot V^2} \quad [10]$$

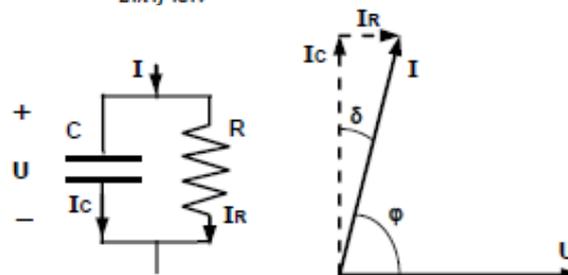


Figura 9: Representação do modelo do fator de dissipação de perdas e do diagrama do vetor para o cálculo da tangente delta [6]

Para esta medição de tendência de tangente delta em máquinas em operação também é proposta a utilização da tensão de fase (+10%) pois se trata de medição de tendência e se realizadas as mesmas condições de medição para esta avaliação, a curva de tendência será com a mesma base de dados e referências.

3.6 Descargas parciais

As descargas parciais são pequenos arcos elétricos em cavidades de ar dentro ou adjacentes à isolação. Este fenômeno ocorre porque a rigidez dielétrica do ar de 3kV/mm é menor do que a isolação sólida que é de aproximadamente 100kV/mm.

O ensaio de descargas parciais, assim como o tangente delta, é tratado como tendência para a avaliação dos sistemas de isolamento. Para este ensaio, existem duas opções de medição: o ensaio off-line, no qual é necessário aplicar tensão de fase + 10%, conforme IEC60034-27; e o ensaio online, quando as medições são feitas diretamente na máquina com tensão nominal e rodando em vazio, conforme IEC60034-27-2, disponibilizando assim, monitoramento tanto periódico quanto contínuo.

O ensaio é aplicado para diagnosticar condições dos enrolamentos estáticos com tensão maior que 3,3kV. Este ensaio não possui critério de aceitação, sendo utilizado para um acompanhamento de tendência ao longo do tempo de operação.

Para o ensaio de descargas parciais, já é aplicada na prática a tensão de fase +10% para o caso do ensaio off-line e, quando já existe o equipamento instalado na máquina elétrica para um monitoramento contínuo, o sistema é energizado como no processo normal de operação.



4 CONCLUSÃO

O principal objetivo do artigo foi propor mais uma opção, além das recomendadas pelas normas, para as tomadas de decisão sobre os níveis de tensão a serem utilizados nas avaliações dos sistemas de isolamento envelhecidos, para os reparos e serviços nas máquinas elétricas. A decisão a ser tomada nestas avaliações sempre é complexa, pois há riscos em todas elas. A opção proposta visa avaliar os sistemas de isolamento nos mesmos níveis de tensão a que são submetidas às máquinas elétricas quando em operação, minimizando o risco de falha neste momento. Porém, é impossível prever o tempo que ainda poderá ser estendido à vida útil da máquina, após as avaliações e serviços realizados.

A maioria das avaliações requer submeter os sistemas de isolamento a níveis de tensão para verificar a capacidade dielétrica dos isolantes. Para máquinas novas, este processo deve ser garantido pelo fabricante da máquina elétrica, por se tratar de equipamento novo. Estes níveis de tensão são normalizados e consideravelmente altos, pois as máquinas elétricas estão sujeitas a altos dV/dt 's em operação normal.

Porém, máquinas com longo período de operação e o sistema de isolamento envelhecido perdem naturalmente a capacidade dielétrica. Ao mesmo tempo, em caso de revisões ou reparos, espera-se mais um período de operação com uma possível ocorrência de falha mitigada. Mas, para a avaliação da integridade deste equipamento, faz-se necessário energizá-lo para verificações dos sistemas de isolamento. Estes mesmos ensaios que são utilizados para avaliações podem eventualmente acarretar uma falha em isolações comprometidas.

Os níveis de tensão para os ensaios dielétricos que comprovam a integridade dos sistemas de isolamento são recomendados pela norma específica. O artigo propõe utilizar as tensões de fase dos enrolamentos +10%, mas também alerta que o dielétrico submetido no teste de avaliações não é totalmente igual ao da operação, pois há níveis gradativos de tensão no enrolamento em operação. Por isso, a possibilidade de falha ainda existe.

Os principais testes foram descritos no artigo, sendo que o da resistência de isolamento não apresenta nenhum risco. O *surge test* também não é tão crítico pelo fácil controle do teste, mas os valores foram sugeridos considerando a tensão de fase +10% vezes 1,7 por poder considerar uma tensão quase CC (pouca variação), não tendo o mesmo efeito tão crítico ao isolante.

Já os testes de tensão aplicada e corona visual são os mais críticos. Para tensão aplicada, o teste é feito com +10% da tensão de fase, monitorando assim, a corrente de fuga e, para o corona visual, a mesma condição de tensão, porém, aplicando em duas fases, simulando o efeito do campo elétrico submetido às bobinas em operação. Os resultados dos pontos de corona visual ficaram em torno de 60% a 70% do mesmo teste, aplicando as recomendações de norma.

Nos testes de tendência de tangente delta e descargas parciais é possível utilizar a tensão proposta pelo artigo, pois apresenta níveis de referência que podem ser comparados com outras medidas anteriormente realizadas. Portanto, a proposição do artigo apresenta resultados eficazes na identificação de tendências de falha no sistema de isolamento em máquinas para reparos e revisões com tensão de fase +10%, mitigando a possibilidade de falha nos testes.

Os resultados apresentados neste trabalho serão complementados com uma pesquisa de tempo médio de sobrevida, a partir da aplicação do método proposto. Neste trabalho futuro, serão analisadas as correlações entre este tempo, as falhas que causaram a nova parada e os resultados de ensaio.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à WEG Equipamentos Elétricos e a seus especialistas em máquinas elétricas pela contribuição e apoio no desenvolvimento deste trabalho. O agradecimento vai também para o Professor Dr. Julio Carlos Teixeira da UFABC, por todas as revisões na proposta do estudo.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SILVA, C. S. **Prescrição da modalidade de manutenção de motores elétricos considerando o custo de manutenção e depreciação do ativo**. Dissertação de mestrado da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Campus Ponta Grossa), 2012.
- [2] RODENBURG, R. L. **Replacements, Units, Service Lives, Factors**. Prepared for U.S. Department of Energy, U.S. Department of the Interior and U.S. Bureau of Reclamation, 1995, PO No. AA-P0-12652-22503.
- [3] STONE, G.C.; SEDDING, H.G.; LLOYD, B.A.; GUPTA, B.K. **The Ability of Diagnostic Tests to Estimate the Remaining Life of Stator Insulation**. IEEE Transactions on Energy Conversion, December 1988, Vol. 3, No. 4, pp. 833-840.
- [4] CIGRE, W.G A1.10. **Survey of Hydrogenerator Failures**. Cigre Report 392; CIGRE: Paris, France, 2009.
- [5] GUEDES, A. S. **Estudo e proposição de técnicas para a avaliação do isolamento em motores de indução trifásicos de baixa e média tensão**. Tese de doutorado da Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.
- [6] MELERO, M. G.; CABANAS, M. F.; ROJAS, C. H.; NORNIELLA, J.; PEDRAYES, F.; BARRERA, J. M. **Fault detection in the manufacturing process of form-wound coils by means of dissipation factor and hipot tests**. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ 09), Valencia (Spain), 2009.
- [7] GUPTA, B. K.; STONE, G. C.; STEIN, J.; **Stator winding hipot (high potential) test**. IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal, Canada. 2009.
- [8] HENAO, H.; CAPOLINO, G. A.; CABANAS, M. F.; BRUZZESE, C.; STRANGAS, E.; PUSCA, R.; ESTIMA, J.; RIERA-GUASP, M.; HEDAYATI-KIA, S. **Trends in fault diagnosis for electrical machines**. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2014.
- [9] BELKO, V. O.; KOSTELIOV, A. M.; PETRENYA, Y. K.; ANDREEV, A. M.; ROITGARZ, M. B. **Numerical Simulation of discharge activity in HV rotating machine insulation**. Conference Paper, Saint Petersburg, Russia, 2014.
- [10] SCHUELLER, M.; SENN, F.; LADSTAETTER, W. **Influences of the one minute withstand voltage test on the electrical endurance of insulation systems of rotating electrical machines**. Inductica, Berlin, Germany, 2009.
- [11] RUX, L. M. **The physical phenomena associated with stator winding insulation condition as detected by the ramped direct high-voltage method**. Dissertation submitted to the Mississippi State University, USA, 2004.
- [12] STONE, G. C.; BOULTER, E. A.; CULBERT, I.; DHIRANI, H. **Electrical insulation for rotating machines. Design, Evaluation, Aging, Testing, and repair**. IEEE Press Series on Power Engineering, 2004.
- [13] RÜNCOS, F.; **Projeto e análise da máquina elétrica trifásica**. Editora OitoNoveTrês, 2º Edição, Volume 1, 2019.
- [14] VORTEX Equipamentos; **Teste de resistência de isolamento**. Fabricante Fluke. <http://www.vortex.com.br>
- [15] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; KUSKO, A. **Máquinas Elétricas**. Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1975.



[16] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS. **Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.** IEEE Std 43 - 2000

[17] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS. **Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines.** IEEE Std 522 – 2004.

[18] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. **Rotating Electrical Machines – Part 1: Rating and Performance.** IEC 60034-1. Geneva, 2004.

[19] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS. **Recommended Practice for Quality Control Testing of External Discharges on Stator Coils, Bars, and Windings.** IEEE Std 1799 – 2012.

[20] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS. **Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation.** IEEE Std 286 - 2000

[21] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. **On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines.** IEC 60034-27+2. Geneva, 2012.



Walter Evaldo Kuchenbecker é PhD em ENERGIA, na linha de pesquisa de Máquinas Elétricas Girantes pela UFABC. Atualmente, participa do programa de pesquisas PDC (Pesquisador Doutor Colaborador) e é Pós-doutorando em ENERGIA na mesma universidade. As suas pesquisas e publicações estão focadas em máquinas elétricas girantes. Experiência de 33 anos na empresa WEG Equipamentos Elétricos, também concentrada em aplicações, fabricação e análises de máquinas elétricas, sendo que nos últimos 10 anos é supervisor das áreas da qualidade e ensaios elétricos.