



EFEITOS DOS CONTAMINANTES NOS ENROLAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES

WALTER EVALDO KUCHENBECKER¹, DANIEL RODRIGO MORETTI²

¹Pesquisador Doutor Colaborador da Pós-Graduação em ENERGIA - UFABC, walterk@weg.net

²Analista de Serviços Externos – WEG Equipamentos Elétricos S.A., morettid@weg.net

RESUMO

Uma parcela expressiva das falhas de isolamento em máquinas elétricas girantes está diretamente relacionada com os fatores ambientais, os quais provocam a contaminação do equipamento. Normalmente, são inerentes ao processo produtivo onde o equipamento está instalado e consequentemente submetido.

Os efeitos dos contaminantes nos materiais isolantes das máquinas elétricas são evidenciados por meio de medições aplicadas nos sistemas de isolamento. Estas avaliações podem ser feitas por curvas de tendências de várias medições em paradas programadas ou de um monitoramento contínuo. A identificação incipiente das alterações das características dielétricas dos isolantes por contaminantes e uma manutenção corretiva, evitarão uma possível falha inesperada e prematura.

Este artigo apresenta a relação de causa e efeito dos fatores ambientais contaminantes e que progressivamente reduzem a vida útil do equipamento, tirando-o prematuramente de operação.

PALAVRAS CHAVE: dielétricos, contaminantes, envelhecimento, caminho de fuga (tracking).

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de falhas nos enrolamentos das máquinas elétricas girantes foi reduzida com a introdução do sistema de impregnação a vácuo (VPI – *Vacuum Pressure Impregnation*) em meados de 1960. A evolução tecnológica dos materiais isolantes e as resinas epóxis também foram constantes desde a implantação do sistema VPI.

Com o aumento da resistência térmica dos materiais isolantes, possibilitou-se reduzir as áreas consumidas por este material, durante a fabricação das máquinas elétricas girantes e consequentemente ajudou a torná-las mais compactas, aumentando a eficiência, capacidade térmica e ainda melhorando o fator de potência. Além disso, materiais modernos resistentes ao efeito corona, aplicados nos enrolamentos, reduzem o impacto aos rápidos surtos de tensão submetidos durante a manobra de disjuntor a vácuo e pulsos de semicondutores, usados nos conversores de frequência.

Porém, as superfícies dos enrolamentos contaminados tendem a causar intensas descargas e possíveis caminhos de fuga. Estas superfícies contaminadas podem levar os enrolamentos a uma falha prematura, agindo da superfície para o interior da bobina. Os contaminantes sobre a superfície dos enrolamentos criam caminhos de fuga, por meio de reações químicas, abrasivos na isolamento (seja por movimentação das bobinas ou partículas suspensas), danos mecânicos em geral, limpeza e secagem imprópria dos enrolamentos, névoa de óleo, umidade, solventes de limpeza, condensação de contaminantes do processo.

O ciclo de falha, basicamente, é composto por quatro fatores: estresse elétrico, térmico, mecânico ou pela contaminação proveniente do ambiente. Esses fatores podem interagir com os componentes do sistema de isolamento de forma a provocar o envelhecimento prematuro e consequentemente a falha do equipamento. Os fatores de estresse podem contribuir para o envelhecimento do sistema de isolamento de forma individual ou combinado entre si.

Os contaminantes provenientes do ambiente estão diretamente relacionados ao processo de modificação das propriedades dielétricas dos materiais, provocando o aparecimento de



subprodutos corrosivos, aumentando a condutividade da isolação, provocando condições para aumento de atividades das descargas parciais e como consequência inevitável a ruptura prematura do estator de alta tensão.

A contaminação normalmente acontece nas cabeças das bobinas dos estatores. Caso a contaminação tenha alguma propriedade condutiva, então um fluxo de corrente se estabelece, desde que exista uma diferença de potencial.

A Figura 1 apresenta o ciclo de falha do sistema de isolação de acordo com a norma IEC 60505 e nele pode-se determinar quais os fatores de estresse o sistema de isolação está submetido.

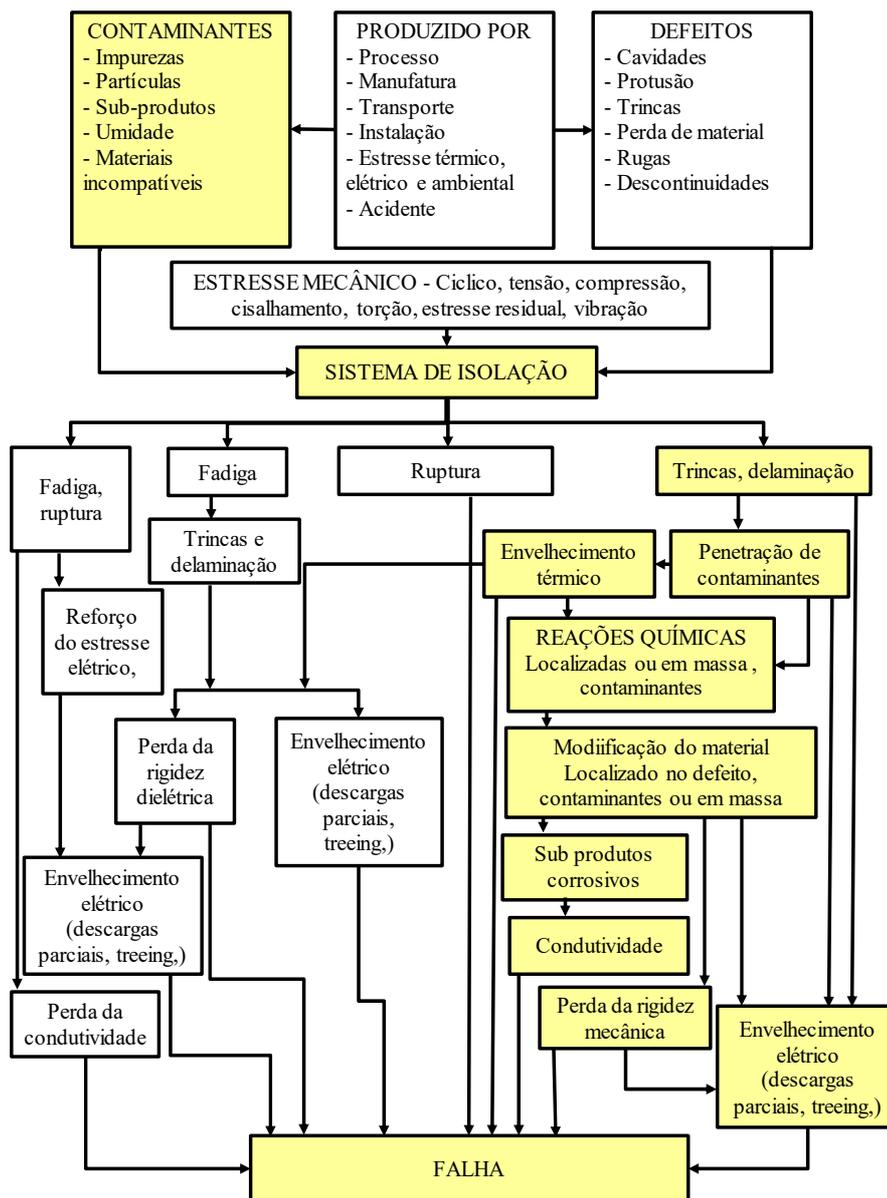


Figura 1: Fluxograma da evolução e correlação de fatores que causam o envelhecimento do sistema de isolação do estator de alta tensão da máquina elétrica gigantes (Fonte: IEC 60505, 2011)



A Figura 2, apresenta o modelo de uma isolação contaminada. Em virtude da contaminação, normalmente criam-se regiões que são denominadas “secas” e demonstradas como R_{seco} e outras $R_{contaminação}$. As regiões mais secas caracterizam-se por terem uma resistência muito maior do que as demais regiões contaminadas e nessa situação, toda a diferença de potencial (tensão fase-fase) se estabelece sobre essa pequena região de resistência mais elevada.

A diferença de potencial elevada, nessa pequena região contaminada, seca e isolada, provoca a ruptura da rigidez dielétrica do ar atmosférico ao seu redor. Essas descargas elétricas degradam e carbonizam a resina orgânica e as fitas do sistema de isolação na região seca tornando-a mais condutiva. O aumento da condutividade nessa pequena área possibilita o estabelecimento da diferença de potencial fase-fase em outra pequena região e, portanto, a carbonização torna-se um processo sucessivo.

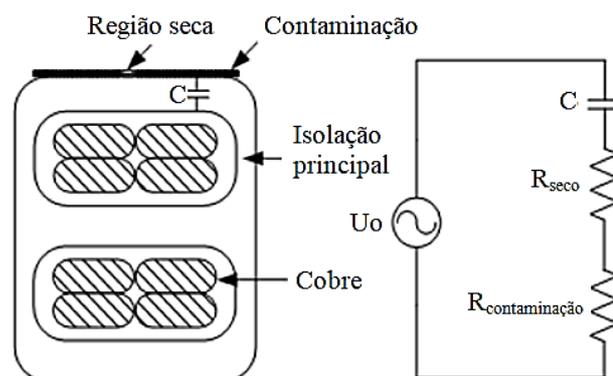


Figura 2: Seção transversal da cabeça de bobina de um estator de alta tensão e seu respectivo circuito equivalente que mostra o fluxo de corrente de fuga (Fonte: LIN, L; 2016).

Os efeitos dos contaminantes sobre os enrolamentos sempre foram motivo de preocupação. Soltani (2009) avaliou o efeito da umidade no dielétrico da isolação por meio da técnica da medição da corrente fuga em corrente contínua. Utilizou barras e bobinas com diferentes tecnologias de isolação (asfalto, epóxi e poliéster) e submeteu em diferentes graus de umidade. No estudo foi demonstrado que uma isolação epóxi-mica moderna apresenta decréscimo significativo dos valores de índice de polarização e de resistência da isolação, quando submetido à contaminação. A redução gradativa do valor de índice de polarização está diretamente relacionada ao tempo de exposição ao ambiente úmido simulado. Soltani também observou que as descargas parciais apresentam tendência de queda em enrolamentos com alto índice de umidade.

Um comportamento análogo é verificado durante a medição da resistência da isolação há 1 minuto. Soltani (2011) observou que o impacto é ainda maior sobre os valores da resistência da isolação e concluiu que a umidade afeta a resistência da isolação por meio da formação de uma camada condutiva sobre a bobina e conseqüentemente aumenta a corrente de fuga.

Neti (2011) simulou maneiras para detectar os efeitos e tendências da umidade e caminhos de fuga nos enrolamentos. Utilizou a técnica de proteção diferencial de alta sensibilidade, monitorando a tendência das perdas dielétricas durante a pulverização de contaminantes nos enrolamentos e monitorou também a atividade de descargas parciais. Ambas as medições apresentaram eficácia na detecção de tendência de falhas pelos agentes contaminantes nas superfícies dos enrolamentos. Demonstrou-se no estudo que uma isolação contaminada apresenta aumento do nível de descargas parciais e pode levar a uma falha iminente.

De forma semelhante, Neti (2011) verificou aumento das perdas dielétricas em virtude da contaminação superficial das cabeças de bobina. Os ciclos sucessivos de spray contaminante foram interrompidos pela ruptura da isolação. A contaminação provocou um aumento na condutividade superficial das cabeças de bobina dos enrolamentos, aumentando as descargas parciais e o caminho de fuga superficial.

Neste trabalho, foi utilizada a mesma técnica de simulação, porém analisando os efeitos com todos os ensaios de avaliação praticados atualmente.



Lin (2016) estudou a influência do vapor de água em conjunto com bobinas contaminadas com óleo lubrificante. Em máquinas de grande porte é muito comum ter contaminação de óleo ou névoa de óleo em função dos pequenos vazamentos dos mancais. Esta contaminação leva a um aumento de descargas parciais, porém com a mistura de névoa de vapor de água isto faz as descargas parciais aumentarem muito mais. O autor utilizou bobinas contaminadas de óleo e variou a umidade relativa, concluindo que com uma umidade em 80%, os caminhos de fuga aumentam consideravelmente e degradam a isolamento rapidamente. Lin (2016) também mostrou que a contaminação por óleo e grafite pode ocorrer nas cabeças de bobina do estator bobinado e que possui propriedades condutivas.

O objetivo desse artigo é apresentar os efeitos dos contaminantes nas superfícies dos enrolamentos, mesmo com isolações das mais modernas disponíveis no mercado e tecnologicamente desenvolvidas. Os parâmetros utilizados para as análises foram com base nos equipamentos mais modernos disponíveis para a avaliação como: resistência de isolamento, tangente delta e descargas parciais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Técnicas para diagnóstico

As técnicas utilizadas na detecção das falhas de isolação têm apresentado uma evolução considerável e tem reduzido a frequência das falhas inesperadas. É comum encontrar diversos métodos de diagnóstico, desde técnicas consolidadas até condições de ensaio pouco difundidas nas comunidades internacionais. É de extrema relevância observar que métodos de diagnósticos não normatizados geram uma série de divergências entre fabricantes, usuários e empresas especializadas na venda de serviços de diagnóstico. Não se discute aqui a eficiência de métodos não normatizados, porém observa-se que técnicas que não foram amplamente discutidas geram falhas de interpretação e por fim um atraso na tomada de decisão.

O diagnóstico do sistema de isolação fica sob a dependência da disponibilidade de equipamentos, de pessoal qualificado e recursos por parte do usuário para contratação do serviço especializado. Como mencionado, os ensaios mínimos de isolação não são definidos em norma, portanto apresenta-se a seguir uma abordagem segura para diagnóstico do sistema de isolação.

2.1.1. Resistência da isolação

O diagnóstico do sistema de isolação realizado de acordo com a IEEE43 é definitivamente o mais difundido e que proporciona uma resposta rápida e acessível. A imposição de tensão em corrente contínua e medição da corrente de fuga possibilita determinar características importantes como o valor da resistência da isolação há 1 minuto e o índice de polarização (IP). Apesar da execução do ensaio ser relativamente simples, a figura 3 mostra o circuito equivalente da isolação para um ensaio de resistência da isolação e índice de polarização.

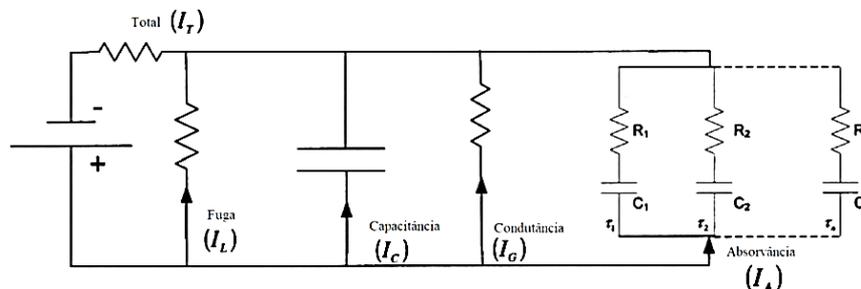


Figura 3: Circuito equivalente de monitoramento da isolação durante o teste de resistência da isolação (Fonte: IEEE43; 2013)



A Figura 4 apresenta o comportamento das correntes do circuito equivalente do sistema de isolamento. A corrente de fuga I_L é constante no tempo e normalmente flui sobre a superfície da isolamento. A corrente capacitiva I_C tem alta magnitude por um curto período de tempo, pois decai exponencialmente com o tempo e a tensão aplicada e depende da geometria da isolamento. A corrente I_G é constante no tempo e flui da superfície em contato com o núcleo para o condutor energizado e está diretamente relacionada com o tipo do sistema de isolamento. A corrente I_A é o resultado do processo de polarização molecular e deslocamento de elétrons.

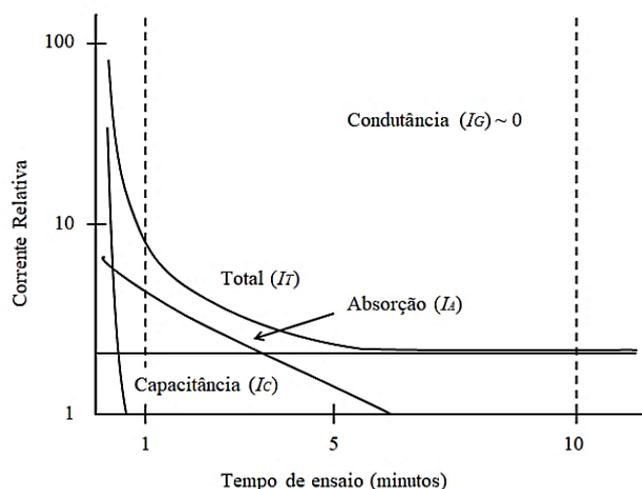


Figura 4: Comportamento das correntes do circuito equivalente do sistema de isolamento

2.1.2. Descargas dielétricas (DD)

O teste de descarga dielétrica mede a corrente de descarga 60 segundos após a conclusão da carga por um tempo de 30 minutos.

$$DD = \frac{I_{descarga}(1min)}{U \cdot C_{Isolação}}$$

O sistema de isolamento é submetido a um processo de carga semelhante ao dielétrico em um capacitor, conforme é apresentado na figura 5. O temporizador é padronizado para 30 minutos de carregamento, o que geralmente é tempo suficiente para que a absorção total aconteça.

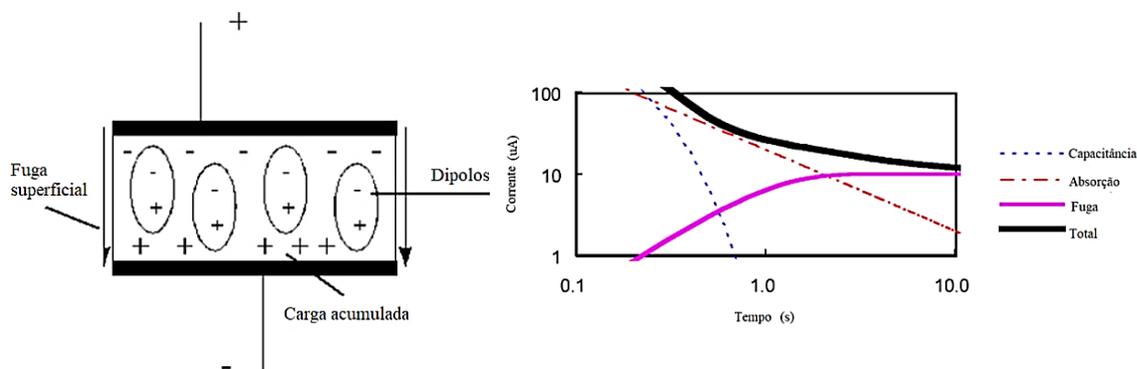


Figura 5: Carga do sistema de isolamento – Correntes elétricas envolvidas (Fonte: Megger)



A carga que é armazenada durante o teste de isolamento é descarregada automaticamente no final do teste. A taxa de descarga depende apenas dos resistores de descarga e da quantidade de carga armazenada do isolamento, conforme figura 6.

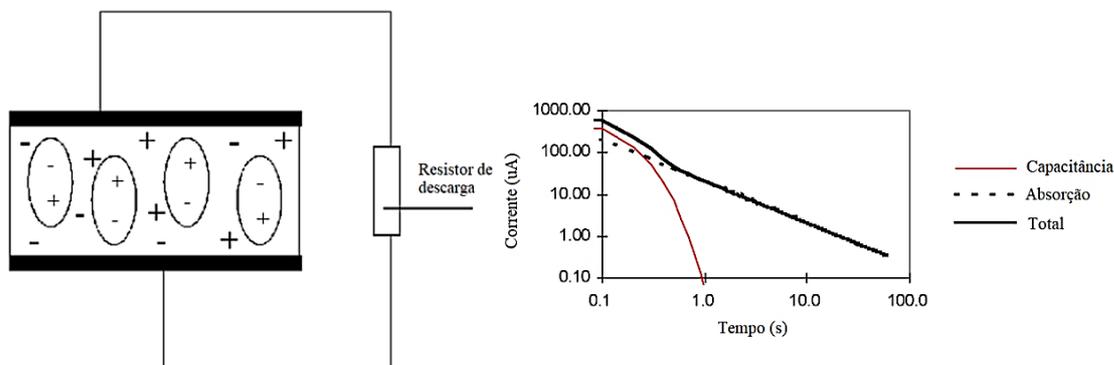


Figura 6: Descarga do sistema de isolamento – Correntes elétricas envolvidas (Fonte: Megger).

O teste de descarga dielétrica mede as correntes de descarga 1 minuto após a conclusão de um teste de isolamento. Neste momento, a corrente capacitiva geralmente se torna insignificante em comparação com a corrente de reabsorção. O nível de reabsorção após esse período mostra o estado do material isolante, desde que o isolamento tenha sido totalmente carregado para que ocorra a absorção total (normalmente 10 a 30 minutos). Uma corrente de reabsorção alta mostra que o isolamento foi contaminado, geralmente pela umidade. Uma corrente baixa geralmente mostra que o isolamento é limpo e não absorveu muita água.

2.1.3. Degrau de tensão (Step Voltage)

O teste de degrau de tensão é aplicável para máquinas elétricas com tensão nominal maior ou igual a 2300V. Este teste pode ser realizado para avaliações em fábrica, como também para máquinas em campo. A aplicação da tensão para realização deste teste pode ser feita em degraus com tempos recomendados de 1 a 3 minutos para cada degrau. O incremento típico é 1 kV por minuto. O ensaio é plotado nos eixos XY (corrente versus tensão aplicada), resultando uma resposta progressiva e contínua da corrente. A figura 7 apresenta o exemplo de degraus de tensão e possíveis resultados para avaliações.

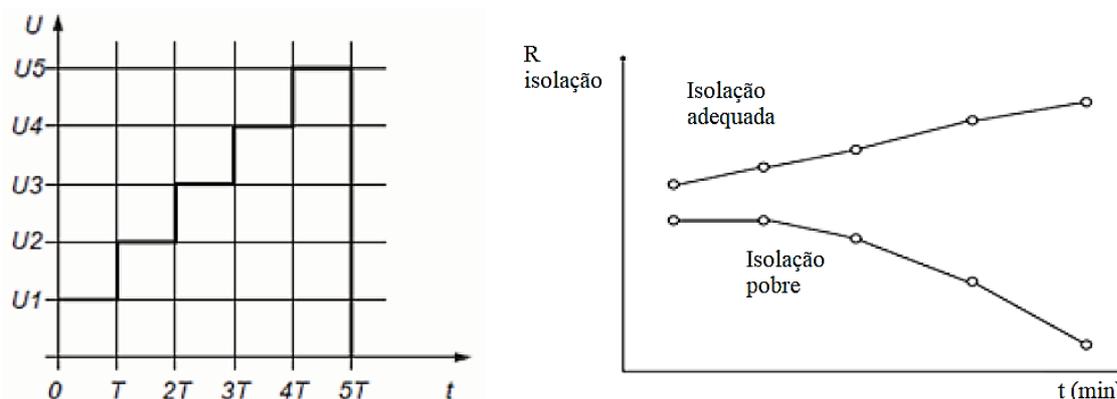


Figura 7: Típico degrau de tensão e comportamento da isolação sob teste de degrau de tensão. (Fonte: BALAN H; 2010)



2.1.4. Perdas dielétricas (Tangente Delta)

A determinação das perdas dielétricas no diagnóstico do sistema de isolamento de alta tensão tem demonstrado ser um dos mais importantes métodos de avaliação. O método é normatizado, porém sem limite definido para enrolamentos completos, o que se exige a determinação de curvas de tendência de acompanhamento da evolução das perdas. De acordo com a norma IEEE286, as causas para o aumento das perdas dielétricas podem ser desde uma falha de fabricação, caracterizado por um desvio no processo de cura, até mesmo a evolução dos níveis de descargas parciais. Semelhante ao método apresentado anteriormente, o ângulo de perdas apresenta variações em função das correntes dielétricas I_o , corrente de carga da capacitância geométrica I_p , corrente de polarização I_{pd} , corrente de ionização das descargas parciais, e corrente de fuga I_L . A Figura 8 mostra como cada mecanismo pode afetar as perdas dielétricas.

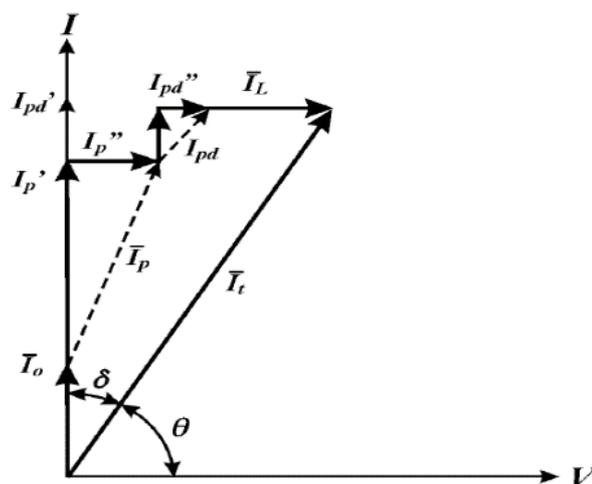


Figura 8: Representação dos mecanismos de perdas dielétricas (Fonte: MORETTI; 2016)

2.1.5. Descargas parciais

O acompanhamento da tendência das descargas parciais tem demonstrado ser uma ferramenta eficiente na prevenção de falhas prematuras do sistema de isolamento. É inegável que o método, já normatizado, tem um papel de destaque por permitir que o diagnóstico seja realizado de forma on-line. A Figura 9 apresenta o típico exemplo de montagem de acoplamento capacitivo para um monitoramento on-line das descargas parciais (DP). Um acoplador capacitivo é instalado em cada uma das fases, normalmente através de conexão individual. O acoplamento gera um sinal de baixa tensão que posteriormente é filtrado e tratado em software específico.

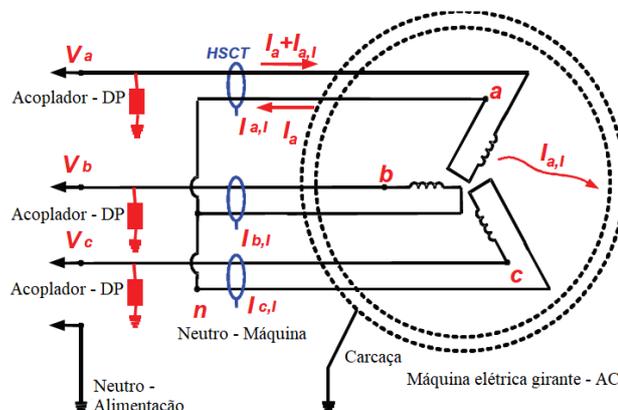


Figura 9: Típico exemplo de instalação de acoplamento capacitivo para monitoramento das descargas parciais. (Fonte: NETI, P; 2011)



A Figura 10 mostra a posição das fontes das descargas parciais dentro do espectro angular do sinal senoidal de tensão aplicada durante o diagnóstico. Para cada nível de tensão durante a execução do ensaio verifica-se a magnitude da predominância das descargas parciais.

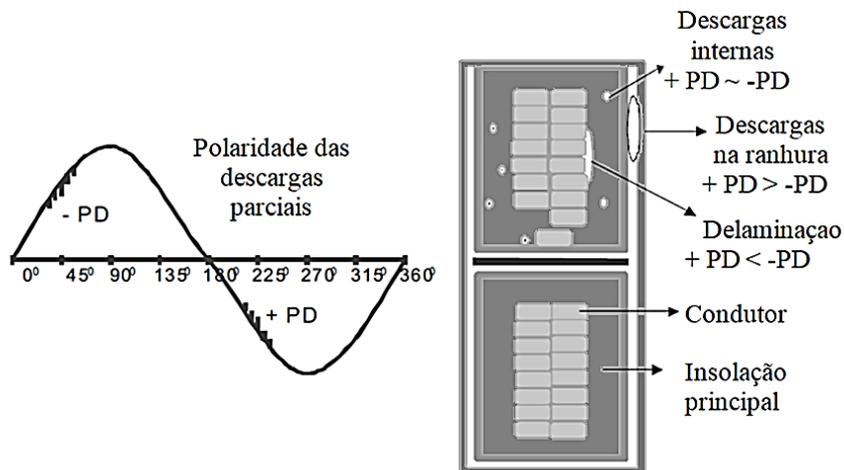


Figura 10: Fontes das descargas parciais em uma isolação de alta tensão para máquinas elétricas girantes (Fonte: MORETTI; 2016)

2.2. Preparação de amostra experimental

Para demonstrar a relação entre a contaminação superficial e os efeitos danosos aos dielétricos utilizados nos enrolamentos estatóricos das máquinas elétricas girantes de alta tensão fabricou-se um protótipo contendo todas as características necessárias para que suportasse uma tensão nominal de 4,16kV. Para que o comportamento da amostra pudesse ser fiel ao estator de alta tensão utilizaram-se todos os materiais necessários como: isolação individual dos condutores, isolação principal com mica, camada de acabamento superficial. Para finalizar o processo, o estator foi submetido ao processo de impregnação VPI.

Por questão de viabilidade de processo a fita contra efeito corona não foi utilizada. Esse fato não tem impacto sobre o estudo abordado uma vez que as conclusões são relativas, ou seja, os resultados são apresentados comparando-se a amostra ideal com a amostra submetida ao contaminante. A figura 11 apresenta a amostra na forma original.



Figura 11: Amostra de estator de alta tensão (Fonte: WEG)



A amostra em questão foi submetida ao ensaio de envelhecimento através do ensaio de Voltage Endurance Test (VET) por um período de 400 horas. O objetivo principal da execução do VET é criar uma condição de degradação semelhante a encontrada com a máquina em operação. Não se apresenta aqui detalhes do VET, uma vez que o objetivo principal é a avaliação da contaminação superficial sobre uma isolamento já degradada pelas condições operacionais como temperatura e estresse elétrico.

Com a amostra envelhecida, primeiramente, foi realizado as medições das condições iniciais sem contaminantes, para as comparações. Em seguida, selecionou-se os materiais contaminantes mais comuns, buscando a similaridade aos encontrados nas aplicações, como água salinizada e fuligens umedecidas.

Para simulação do comportamento dielétrico dos enrolamentos de máquinas elétricas utilizadas em ambientes salinizadas (plataformas de petróleo), utilizou-se em torno de 35g de sal para cada litro de água, relação esta encontrada aproximadamente na água do mar. A Figura 12 apresenta a amostra sendo borrifada com o contaminante, nos dois lados das cabeças de bobina.



Figura 12: Amostra de estator de alta tensão - Contaminado (Fonte: WEG)

Logo após o término das medições, para a análise do efeito do contaminante de água salinizada sobre um enrolamento envelhecido, a amostra passou novamente por um processo de lavagem, limpeza e com respectiva secagem em estufa para retornar as condições iniciais. Nestas condições, novas medições foram realizadas para comparações com um novo processo de contaminação.

As máquinas elétricas operam nas mais diversas aplicações e por isso, estão sujeitas também aos mais diversos contaminantes suspensos no ar. Estas fuligens que contaminam os enrolamentos na operação foram representadas pela aplicação de uma serragem fina umedecida na amostra, conforme mostra a Figura 13.



Figura 13: Amostra contaminada com serragem fina umedecida (Fonte: WEG)



3. MEDIÇÕES E ANÁLISES DOS RESULTADOS

3.1. Protótipo com isolamento envelhecida e contaminado com água salinizada

Como condição inicial tem-se uma amostra de estator bobinado para 4,16kV que foi submetido ao processo de envelhecimento acelerado. O envelhecimento da isolamento foi simulado através da utilização de dois fatores: tensão e temperatura.

Após término do envelhecimento a amostra passou por um processo de rejuvenescimento e posteriormente submetido aos ensaios dielétricos. Na Tabela 1 verifica-se que os resultados apresentados na coluna “Condições iniciais” demonstram que a amostra apresenta parâmetros ideais para ser usada como referência.

Após aplicação da água salinizada, verificou-se que a resistência da isolamento para a fase W apresentou um nível muito baixo e, portanto, os demais ensaios não foram realizados para evitar um dano maior. Avaliando-se a causa raiz da falha da amostra conclui-se que o elevado nível de contaminação superficial somado a uma possível trinca provocada pelos efeitos operacionais simulados durante o ensaio de VET foram os causadores do baixo nível de isolamento.

Tabela 1: Resultados dos ensaios – Amostra contaminada com água salinizada

Ensaio	Unidade	Amostras					
		Condições iniciais			Contaminado		
		U	V	W	U	V	W
Rôhmica	Ω	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
R1min @40°C	G Ω	4,82	4,87	4,72	3,40	4,20	0,02
IA	-	1,9	1,9	1,9	-	-	-
IP	-	5,20	5,00	5,20	-	-	-
Tan δ @20°C	%	3,71	3,84	4,25	-	-	-
Média Tan δ (Tip-up)	%	0,24	0,18	0,46	-	-	-
Máx Δ tan δ	%	1,46	0,94	1,05	-	-	-
QM +	mV	181	191	-	-	-	-
QM -	mV	-	112	-	-	-	-
DD	-	1,50	1,60	1,50	-	-	-
DAR	-	4,20	4,20	4,80	-	-	-

3.2. Ensaio 2 - Amostra revitalizada e contaminada com água salinizada

Em virtude da falha detectada no ensaio 1, a amostra foi submetida ao processo de revitalização. O processo de revitalização consiste em rejuvenescer a região superficial do enrolamento evitando que contaminantes possam provocar um déficit no grau de isolamento do estator. Após revitalização, a amostra de estator bobinado foi submetida a uma nova bateria de testes para garantir a condição inicial e posteriormente ser submetida ao efeito do contaminante superficial. Na Tabela 2, verifica-se que a contaminação por água salinizada tem impacto significativo na resistência da isolamento causando uma queda considerável no índice de polarização para a fase W. Essa queda, tanto na resistência da isolamento quanto no índice de polarização, está diretamente relacionada com um aumento da corrente de fuga superficial.

Destaca-se o aumento nas perdas dielétricas Tan δ @20°C para a fase W e a queda da média do Tan δ (Tip-up) para as fases U e W. A queda na média do Tan δ (Tip-up) pode estar relacionada ao aumento da corrente de fuga e, portanto, uma mudança nas perdas em todos os níveis de tensão de teste.

Não se verificou uma mudança expressiva nos níveis de descargas parciais quando se compara a amostra revitalizada com a amostra contaminada. Esse comportamento indica que a contaminação superficial não possibilita consistentemente a propagação do “tracking” quando o campo elétrico é mantido por um período de tempo curto. O “tracking” é um fenômeno acumulativo e requer a existência constante de campo elétrico para gerar um impacto nas medições de descargas parciais.

A resposta à descarga dielétrica indica que a isolamento não absorveu o contaminante. Esse comportamento está coerente com o fato da amostra ter sido submetida ao processo de rejuvenescimento, ou seja, a amostra encontra-se encapsulada.



Os dados de DAR apresentam que a contaminação não tem impacto direto na absorção. Isso se deve ao fato da corrente de absorção estar diretamente relacionada com a polarização molecular e desta forma, envolve a medição de correntes com grandezas maiores que a corrente de fuga. Destaca-se que a isolação epóxi-mica tem uma característica não higroscópica, portanto ao aplicar o contaminante verificou-se através dos ensaios de descarga dielétrica (DD) e razão de absorção (DAR) que não houve mudanças significativas uma vez que não era esperada uma absorção da umidade presente no contaminante.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios – Amostra revitalizada e contaminada com água salinizada

Ensaio	Unidade	Amostras					
		Condições iniciais			Contaminado		
		U	V	W	U	V	W
R. ôhmica	Ω	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
R1min @40°C	GΩ	7,04	6,44	7,27	6,21	3,78	1,77
IA	-	1,9	2,0	2,1	1,8	1,9	1,4
IP	-	5,5	5,5	4,4	3,9	4,6	1,0
Tan δ @20°C	%	3,36	4,26	4,26	3,38	4,28	4,80
Média Tan δ (Tip-up)	%	0,16	0,15	0,12	0,07	0,14	0,04
Máx Δtanδ	%	0,80	0,94	0,77	0,66	0,74	0,58
QM +	mV	251,0	242,0	146,0	200,0	289,0	129,0
QM -	mV	53,0	233,0	131,0	171,0	293,0	117,0
DD	-	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0
DAR	-	4,2	4,6	4,2	4,2	4,5	4,2

3.3. Ensaio 3 - Amostra revitalizada e contaminada com serragem umedecida

Após realização dos ensaios com amostra contaminada com água salinizada, a amostra foi submetida a um novo processo de lavagem para eliminar a contaminação. Após procedimento de limpeza, o estator foi submetido a uma nova bateria de ensaios para avaliação do impacto da contaminação por serragem umedecida.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios antes e após contaminação por serragem umedecida. Os resultados apresentados na coluna “Condições iniciais”, demonstram que o protótipo apresentou melhores resultados para a resistência da isolação (R1min @40°C) e índice de polarização (IP). Houve queda nas perdas dielétricas (Tan δ @20°C) e pequena melhora na resposta ao (DAR). Esse comportamento é coerente já que o protótipo foi submetido ao processo de limpeza para eliminação do contaminante.

Na coluna denominada “Contaminado” observa-se uma queda no valor da resistência da isolação (R1min @40°C), possivelmente causado pelo excesso de material contaminante. Ao inserir um material contaminante em quantidade suficiente para obstruir os canais de ventilação houve uma variação no valor da capacitância da fase que afetou a corrente capacitiva durante o processo de polarização. Considerando que as demais características, absorção e fuga, não foram afetadas verifica-se um aumento nos valores de (IA), (IP) e (DAR). Por outro lado, verifica-se aumento nas perdas dielétricas (Tan δ @20°C), o que pode demonstrar que a corrente de fuga é mais expressiva quando o ensaio é realizado em corrente alternada. O fato dos valores da média do Tan δ (Tip-up) e (Máx Δtanδ) indicam que o contaminante utilizado não afetou significativamente a magnitude das descargas parciais.

Os níveis de descargas dielétricas (DD) apresentaram aumento considerável. Esse aumento indica perda de homogeneidade da isolação provocada pela inserção do material contaminante entre os canais de ventilação do estator.

Os níveis de descargas parciais representam uma tendência de queda nas magnitudes quando se compara o ensaio antes e após contaminação. Esse comportamento pode estar relacionado com a alta umidade aplicada sobre a serragem durante a simulação de contaminação. A alta umidade provoca um aumento na corrente de fuga entre os enrolamentos de fases diferentes “equalizando” a diferença de potencial sobre o material contaminante. O efeito do caminho de fuga (tracking) é provocado quando a região contaminada apresenta elevada diferença de potencial e isto ocorre somente em regiões contaminadas e secas, conforme modelo da figura 2.



Um comportamento semelhante foi verificado por Soltani (2009). No estudo sobre o efeito da umidade sobre a atividade de descargas parciais Soltani (2009) identificou que após sucessivos dias de exposição à elevada umidade a atividade de descargas parciais foi suprimida.

Tabela 3: Resultados dos ensaios – Amostra revitalizada e contaminada com serragem umedecida

Ensaio	Unidade	Amostras					
		Condições iniciais			Contaminado		
		U	V	W	U	V	W
R. ôhmica	Ω	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
R1min @40°C	G Ω	9,73	9,59	14,05	8,40	7,31	11,05
IA	-	1,80	1,74	1,50	1,9	1,8	2,1
IP	-	4,43	4,29	3,37	5,7	5,0	4,8
Tan δ @20°C	%	2,60	2,50	3,40	2,75	2,88	4,00
Média Tan δ (Tip-up)	%	0,04	0,15	0,10	0,06	0,06	0,06
Máx Δ tan δ	%	0,70	0,70	0,60	0,70	0,88	0,75
QM +	mV	206,0	310,0	243,0	108,0	147,0	182,0
QM -	mV	53,0	175,0	287,0	85,0	128,0	175,0
DD	-	0,9	0,9	1,0	1,71	1,74	1,77
DAR	-	3,70	3,65	3,67	4,2	4,7	4,9

4. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste artigo é apresentar os efeitos dos contaminantes no sistema de isolamento de média tensão aplicado aos enrolamentos das máquinas elétricas girantes. Para isso, em um protótipo de estator bobinado com tensão nominal de 4,16kV, foram aplicados dois contaminantes comumente encontrados nas mais diversas aplicações. Os ensaios escolhidos para avaliação foram selecionados em virtude de referência normativa, metodologia e capacidade de diagnosticar tendências de falhas.

O protótipo foi submetido a um ciclo de VET para envelhecimento acelerado, mas mantendo os parâmetros do sistema de isolamento dentro dos critérios de aceitação. Logo na primeira contaminação com água salinizada, o isolamento foi afetado, levando os altos índices de isolamento para zero em uma das fases (W) do enrolamento, sendo necessário interromper as experiências. Esta absorção do contaminante se deu por microfissuras das isolações.

Para a repetição deste contaminante, foi necessário um rejuvenescimento do protótipo e posteriormente realizar uma nova medição, retornando os valores de isolamento. Por tratar-se de uma contaminação superficial, verificou-se um impacto expressivo na corrente de fuga, comportamento que pôde ser validado através da queda do índice de polarização após contaminação. O aumento da corrente de fuga também apresentou mudança no comportamento das perdas dielétricas, que pôde ser verificado no aumento Tan δ @20°C para a fase W e na queda da Média Tan δ (Tip-up) das fases U e W. A queda da Média Tan δ (Tip-up) está relacionada com o aumento das perdas nos menores degraus de tensão de teste.

Após revitalização do protótipo aplicou-se o segundo contaminante, serragem umedecida, em quantidade suficiente para obstrução completa dos canais de ventilação do estator. Essa situação afetou o valor da capacitância de fase e, portanto, aumentou a corrente capacitiva durante a polarização dielétrica. O aumento na corrente capacitiva reduziu a resistência da isolação, porém causando um efeito contrário ao esperado para (IA), (IP), (DAR). É intuitivo concluir que enrolamentos contaminados apresentam baixos valores de (IA), (IP) e (DAR), porém possíveis mudanças na capacitância geométrica podem afetar significativamente esses índices. O índice (DD) apresentou resposta significativa, demonstrando que a inserção do contaminante provocou perda de homogeneidade da isolação do estator. As descargas parciais apresentam uma tendência de queda quando submetido ao contaminante com elevado índice de umidade.

A tendência de queda nas descargas parciais pode estar alinhada com a publicação *“Electrical insulation for rotating machines, STONE C.G., 2014”*. Esta publicação mostra que regiões contaminadas e denominadas “úmidas” não provocam o aparecimento de elevada diferença de potencial, portanto não permite que descargas elétricas provoquem aparecimento de danos por caminhos de fuga. À medida que a temperatura da máquina é elevada em virtude da operação



a umidade superficial diminui e permite o aparecimento de descargas, desencadeando outros fenômenos como efeito corona e caminho de fuga.

As experiências mostraram que sistemas de isolamento envelhecidos são facilmente afetados pelos contaminantes, mesmo com bons parâmetros de isolamento quando limpos e secos. Com rejuvenescimento, o sistema de isolamento se mostrou mais resistente aos contaminantes, porém com variações em alguns parâmetros medidos. Os fatores de estresse, inerentes à operação da máquina elétrica, combinados com contaminantes aceleram a degradação do sistema de isolamento e podem levar o equipamento a perder o seu nível de confiabilidade. A perda de confiabilidade está diretamente ligada ao risco da redução da disponibilidade e consequentemente paralização inesperada da produção, onde a máquina elétrica está envolvida. Recomenda-se o acompanhamento dos parâmetros da máquina elétrica girante e preditivamente, realizar as manutenções necessárias.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à WEG Equipamentos Elétricos S.A. pelo protótipo utilizado nas experiências, pela possibilidade de utilizar a estrutura e equipamentos e por todo apoio no desenvolvimento deste trabalho. O agradecimento vai também para o Professor Dr. Julio Carlos Teixeira da UFABC, por sua revisão na proposta do estudo.

6. REFERÊNCIAS

- [1] BALAN H., BUZDUGAN M., MUNTEANU R. A., BOTEZAN A., COZORICI I., AVRAM V.; *Insulation resistance testing of the medium voltage switches*, 2010. Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering, N 34, 2010.
- [2] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 43: *Recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery*, New York, 2000. Disponível em: < <https://standards.ieee.org/findstds/standard/43-2000.html>>. Acesso em: 15 Jun. 2014. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [3] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 56: *IEEE Guide for Insulation Maintenance of Electric Machines*, New York, 2016. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7830766>>. Acesso em: 7Out. 2019. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [4] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 95: *IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage*, 2002. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/996345>>. Acesso em: 28Jul. 2020. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [5] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 1434: *Guide for the measurement of partial discharges in AC electric machinery*, New York, 2000. Disponível em: < <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1434-2000.html>>. Acesso em: 15 Jun. 2014. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [6] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION 60505: *Evaluation and qualification of electrical insulation system*, Switzerland, 2011. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/2276>>. Acesso em: 29 Ago. 2019. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [7] LIN, L; KANG, A; SONG, J; LEI, Z; ZHAO, Y; ISENBERG, A; *Effect of Water Vapor on Oil-contamination Discharge of Stator Windings*. China, 2016. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7736828>>. Acesso em: 7Out. 2019. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [8] MEGGER; User guide - MIT515, MIT525 and MIT1025, 2008. Disponível em: <<https://megger.com/10-kv-diagnostic-insulation-resistance-tester-mit1025#overview>>. Acesso em: 28 Jul. 2020. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [9] MEGGER; *Dielectric discharge test*. Disponível em: <<https://megger.com/support/technical-library/application-notes/dielectric-discharge-test>>. Acesso em: 28 Jul. 2020. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.
- [10] MORETTI, D,R; *Investigação experimental sobre faltas em isolamento de alta tensão aplicada em estatores de máquinas elétricas*, 2016. Dissertação (mestrado) - Curso de Pós-



Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2016.

[11] NETI, P.; ZHANG , P.; QI, X.; ZHOU, Y.; YOUNSI, K.; SHAH, M.; WEEBER, K.; *Online detection of endwinding contamination in industrial motors*, 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/05996159>>. Acesso em: 26 Nov. 2019. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

[12] SPEZIA, F. R.; MORETTI, D. R.; *Effects of the lubrication oil over the endurance of na insulation systema of medium voltage turbogenerators*. INSULEC International Conference on Electrical & Electronic Insulating Materials & Systems, 2015.

[13] SOLTANI, R.; DAVID, E.; LAMARRE, L.; LAFORTUNE, L.; *Effect of humidity on charge and discharge current of large rotating machines bar insulation*. Canada, Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7736828>>. Acesso em: 7Out. 2019. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

[14] STONE C. G.; CULBERT I.; BOULTER E.A.; DHIRANI, H.; *Electrical insulation for rotating machines*. USA, 2014.

[15] VON ROLL; *Fundamentals of Insulation Technology*, 2008.



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 S.A., também concentrada em aplicações, fabricação e análises de máquinas elétricas, sendo que nos últimos 11 anos é supervisor das áreas da qualidade e ensaios elétricos.



Daniel Rodrigo Moretti é mestre em MÁQUINAS ELÉTRICAS, na linha de pesquisa de isolamento de Máquinas Elétricas Girantes pela UFSC. Atualmente, trabalha com serviço de campo na WEG Equipamentos Elétricos S.A. – Unidade ENERGIA. Experiência de 9 anos na empresa WEG concentrada em aplicações, fabricação, controle da qualidade e análises de máquinas elétricas.