Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH

Avaliação Dielétrica de Barras Estatóricas Baseada na Norma IEC 60034-27-2

FERNANDO DE SOUZA BRASIL(1); PAULO ROBERTO MOUTINHO DE VILHENA(1); VICTOR DMITRIEV(2); ELN(1);UFPA(2);

RESUMO

Várias fontes de atividade de descarga que ocorrem em geradores foram replicadas no laboratório em condições controladas. Cada fonte foi avaliada individualmente e registrada com um sistema comercial de medição de descargas parciais (MPD 600). São apresentadas as características dominantes de cada padrão de resolução em fase de descargas parciais, do inglês *Phase Resolved Partial Discharges* (PRPD). A associação de cada tipo de fonte de descarga bem definida, com seu padrão de PRPD específico, constitui a base do nosso banco de dados usado para o reconhecimento da fonte de descarga durante o diagnóstico do gerador. A comparação dos resultados laboratoriais com os PRPD apresentados na IEC 60034-27-2 -2012 está resumida neste artigo.

PALAVRAS-CHAVE

Descargas Parciais, Padrões PRPD, reconhecimento de fontes de descargas, diagnóstico de geradores.

1. INTRODUÇÃO

Durante a operação os componentes de um hidrogerador são continuamente expostos a efeitos elétricos, térmicos, mecânicos e ambientais. Uma combinação desses estresses ou apenas um deles resulta em uma falha nos componentes da máquina, que se não for detectada e consertada a tempo, pode ocasionar a indisponibilidade do equipamento ou em casos mais graves, falhas catastróficas [1]. Diante das necessidades do sistema elétrico, as atividades de manutenção tendem a migrar da manutenção preventiva para a manutenção preditiva, ou seja, uma migração da manutenção baseada no tempo para a manutenção baseada no estado atual do equipamento. Neste contexto, as técnicas de monitoramento online têm sido adotadas como a principal ferramenta para obter informações do sistema ou equipamento a ser mantido, sem colocar em risco a operação segura e a confiabilidade dos equipamentos, permitindo o conhecimento de sua condição durante sua operação, além de poder diagnosticar eventuais não conformidades [02].

Nesse sentido, técnicas como o monitoramento das condições de operação dos equipamentos, seu diagnóstico preditivo e a manutenção centrada na confiabilidade contribuem fortemente na elaboração de programas de manutenção, capazes de melhorar o desempenho e estender a vida útil dos equipamentos assim geridos [01]. Dentre os possíveis modos de falha em máquinas síncronas, quer sejam elas motores ou geradores, as falhas no isolamento elétrico podem causar os mais severos danos pessoais e materiais, além de prejuízos ambientais e econômicos de grande custo. Neste sentido, faz-se necessário, que a degradação dos sistemas isolantes nestes equipamentos seja detectada e quantificada o quanto antes, de modo que as convenientes ações de reparação possam ser programadas em tempo hábil. Quanto à monitoração dos sistemas de isolação em máquinas síncronas, a medição e a análise de Descargas Parciais (DP) são as principais técnicas de diagnóstico, utilizada com comprovada eficácia [03,04]. De acordo com a norma da Comissão Eletrotécnica Internacional IEC 60270

(*) Rodovia Arthur Bernardes, n° 2172 – Eletrobras Eletronorte – CEP 66115-000 Belém, PA, – Brasil
Tel: (+55 91) 3257-7516 – Email: fernando.brasil@eletronorte.gov.br

[05], Descargas Parciais são descargas elétricas localizadas que curto-circuitam parcialmente o isolamento entre condutores, e que podem ou não ocorrer adjacentemente a um condutor.

A interpretação dos sinais de DP provenientes do enrolamento estatórico é um sintoma de um processo de defeito que pode evoluir para uma falha e não uma causa direta, normalmente não é possível especificar um nível de uma grandeza de DP onde há um alto risco de falha do isolamento. Entretanto, significativa interpretação de resultados on-line é possível usando-se várias fontes de informação, que pode incluir não somente os resultados on-line de DP, mas também o conhecimento do projeto da máquina, o histórico de manutenção, inspeções visuais, vários testes off-line, condições de operação e conhecimento especializado apropriado.

Em geral, interpretação de resultados on-line de DP deve ser realizada em dois passos. Primeiro, é fundamental para qualquer planejamento de manutenção saber se há problemas de isolamento, indicado por significante atividade de DP. Se verificado, então a fonte específica de atividade de DP precisa ser determinada para uma avaliação mais detalhada. Desde que o grau de deterioração, e consequentemente o risco de falha do isolamento, depende consideravelmente no tipo específico de descargas parciais, é crucial ter uma boa informação sobre a fonte de qualquer atividade de DP significativa, como por exemplo, o tipo e a possível localização dentro do enrolamento do estator da máquina.

Um meio eficaz de interpretar dados on-line de DP é avaliar a tendência de parâmetros específicos de DP ao longo do tempo. Para novas máquinas é essencial, para uma avaliação de tendência confiável, ter uma impressão inicial da atividade de DP para então ser usada para comparação com medições de DP regular ou contínua subsequentes. Em máquinas antigas os parâmetros de comparação serão as primeiras medições realizadas.

Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo geral simular e registrar em laboratório todos os padrões de descargas presentes em máquinas rotativas e descritos nas IEC 60034-27-2[6] para um maior domínio das medições de DP realizados nas usinas da Eletrobrás Eletronorte.

2. RECONHECIMENTO DE PADRÕES

Através da discriminação de pulsos DP de acordo com a fase PRPD [2] é possível determinar o defeito predominante no dielétrico. A Figura 1 apresenta alguns exemplos de padrões de DP que normalmente podem ser encontrados para defeitos em sistemas de isolamento do enrolamento do estator. Nota-se, que os padrões diferentes dos mostrados aqui podem também ocorrer para diferentes fontes de DP. Os usuários devem estar cientes de que vários efeitos adicionais, não mostrados aqui, podem ocorrer durante medidas DP on-line que também podem produzir outros padrões característicos DP. Nas medidas em campo também é possível acontecer superposição de padrões, variações na forma, variações na frequência ou outras características.

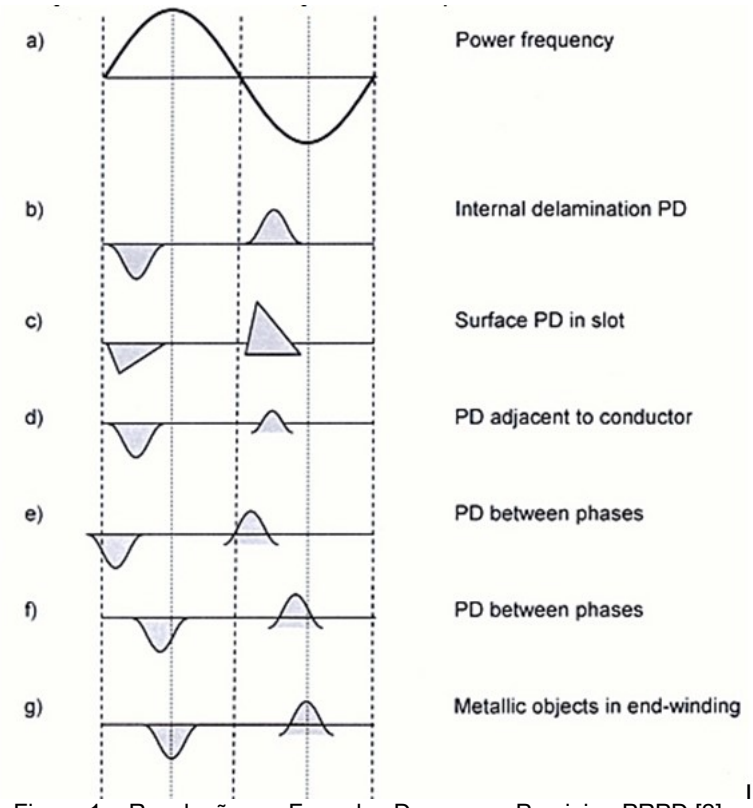
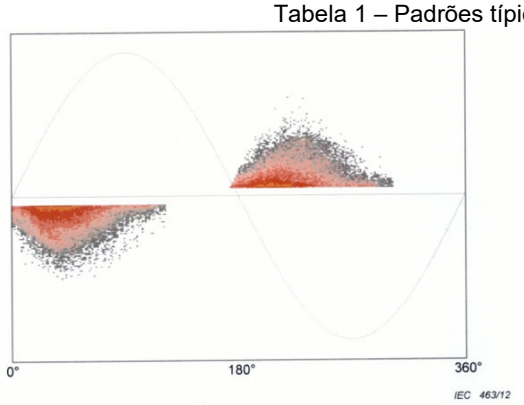


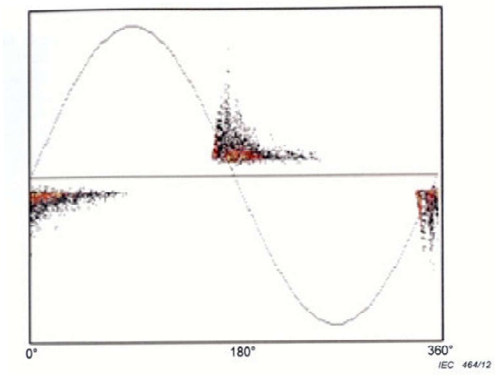
Figura 1 – Resolução em Fase das Descargas Parciais - PRPD [2]

Verificou-se que os defeitos encontrados em medições realizadas em campo [10] refletem o padrão definido na norma IEC:2012 TS 60034-27-2. Importante destacar que os estatores avaliados são de diferentes fabricantes e foram instalados em datas diferentes e os acopladores utilizados são de 80 pF. Na tabela 1 é possível observar os padrões típicos de descargas parciais [2].

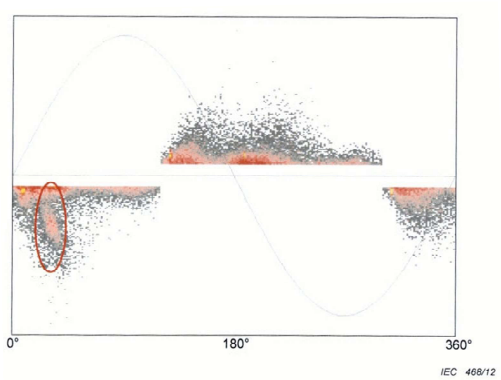
Tabela 1 – Padrões típicos de descargas parciais [2].



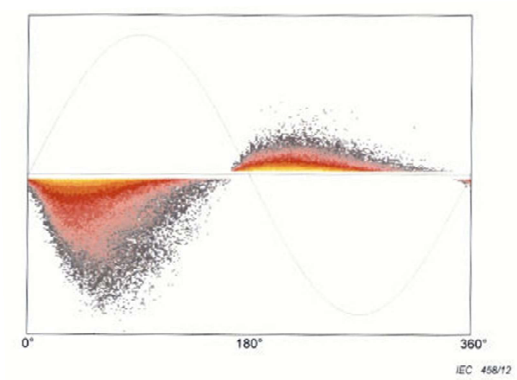
(a) Descarga Interna devido a vazios internos



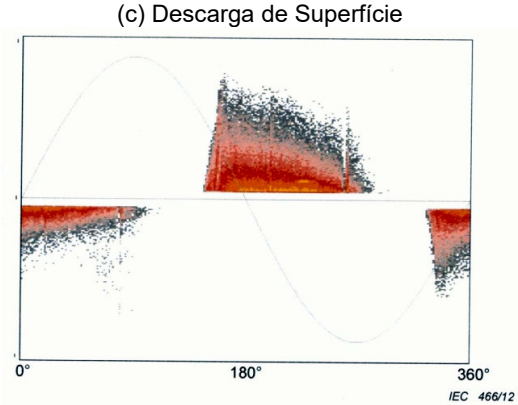
(b) Descarga Interna devido a delaminação interna



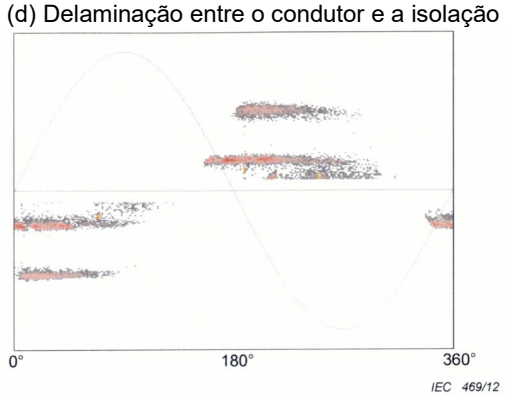
(c) Descarga de Superfície



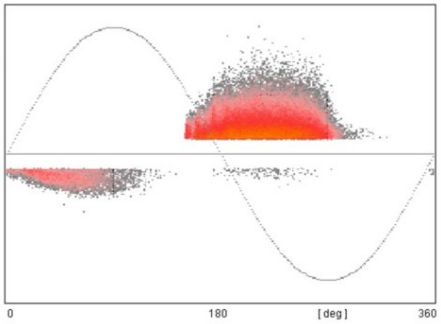
(d) Delaminação entre o condutor e a isolação



(e) Descarga de ranhura



(f) Descarga tipo Gap



(g) Descargas Corona

3. CARACTERIZAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DESCARGAS

As diferentes fontes de atividade das descargas parciais que ocorrem em hidrogeradores foram simuladas em laboratório sob condições bem controladas. Cada fonte foi avaliada individualmente e seu PRPD foi registrado através de um sistema comercial de medição de descargas parciais (MPD 600) que possui as seguintes características, frequência central de 0 a 32 MHz, e diferentes larguras de banda quem variam desde a banda estreita de 9 kHz até banda larga de 3 MHz. A Figura 2 apresenta o layout montado em laboratório para a realização dos experimentos.

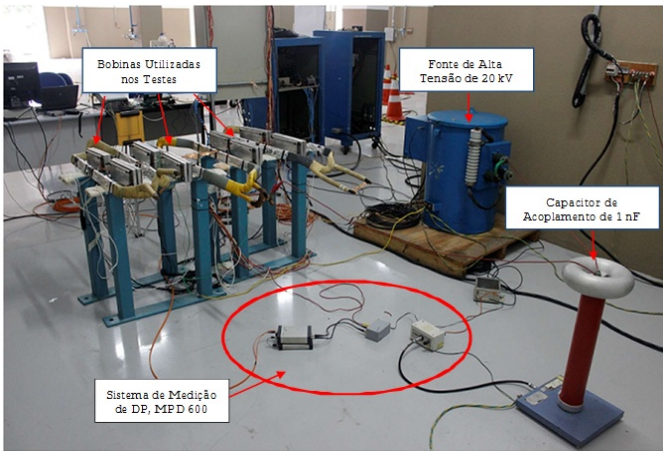


Figura 2 - Layout montado em laboratório para realização dos experimentos.

3.1 Descargas Internas

A descargas parciais internas são geradas em pequenas cavidades na isolação principal preenchidas com de ar ou gás. Elas são originadas durante o processo de fabricação e não indicam fatores de envelhecimento. Sob circunstâncias normais, descargas internas não levam a um envelhecimento acentuado. A principal característica do padrão PRPD de descargas internas é a simetria entre as DP positiva e negativa, combinadas com uma forma arredondada, conforme Tabela 1.

Essa atividade foi observada em laboratório através de medições descargas parciais em que se registrou o PRPD característico de descargas interna. O PRPD, Figura 3, obtido em laboratório mostra a simetria entre as DP positiva e negativa, combinadas com uma forma arredondada.

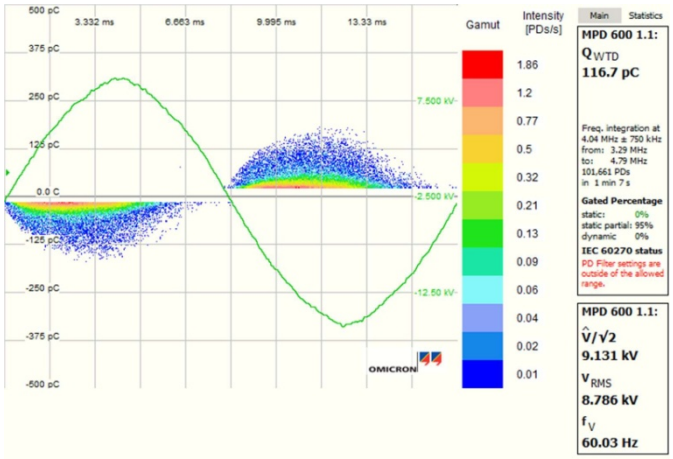


Figura 3 - PRPD obtido em laboratório para descargas internas.

3.2 Delaminações

A delaminação interna no isolamento do estator pode ser causada durante o processo de fabricação ou pelo sobreaquecimento das bobinas, onde à medida que o sistema de isolação é exposto continuamente a esse sobreaquecimento, as resinas orgânicas tendem a perder sua rigidez mecânica, ocorrendo assim o descolamento das camadas da isolação, acarretando um fenômeno conhecido como delaminação das camadas. A principal característica do PRPD de uma atividade de descarga de delaminação interna é a simetria entre as DP positiva e negativa, combinadas com uma forma triangular, conforme ilustrado na Tabela 1.
Essa atividade foi observada em laboratório através de medições descargas parciais em que se registrou o PRPD característico de delaminação interna. Após dissecação da bobina e inspeção visual foi constatado a presença de delaminações entre as camadas de isolação, conforme apresentado na Figura 4. O PRPD, Figura 5, obtido em laboratório mostra a simetria entre as DP positiva e negativa, combinadas com uma forma triangular.

Figura 4 - Dissecação da bobina e constatação de delaminações.

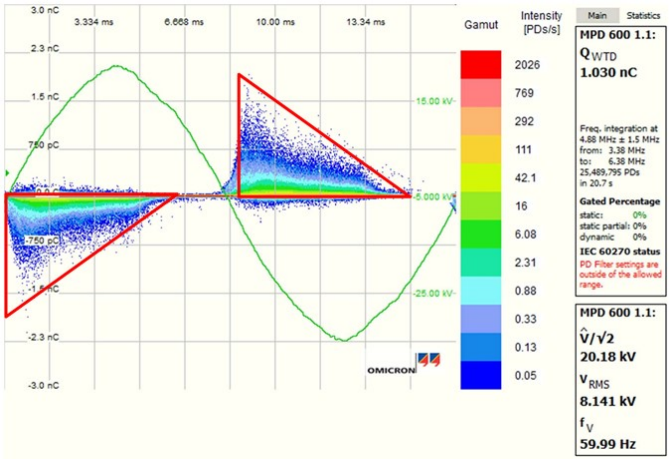


Figura 5 - PRPD obtido em laboratório para delaminações.

3.3 Corona na Junção de Controle de Estresse de Tensão e Camada Semicondutiva

A descarga corona pode ocorrer ao redor da bobina/barra a poucos centímetros fora do núcleo do estator, na junção entre a camada semicondutiva, utilizada na ranhura, e a fita para controle do estresse de tensão, utilizada nos terminais de saída do enrolamento. O PRPD característico da atividade corona na junção de controle de estresse de tensão, no PRPD é representado por uma assimetria em favor de descargas positivas, ocorrendo durante o meio ciclo negativo de tensão, combinadas com uma forma arredondada, conforme ilustrado na Tabela 1.

No laboratório, essa atividade foi observada durante o ensaio de envelhecimento acelerado, em que houve o desgaste da bobina na zona de transição entre a camada semicondutiva e a fita para alívio de tensão. A Figura 6, a seguir, apresenta o desgaste observado durante o ensaio de envelhecimento acelerado.

Figura 6 - (a) e (b) Indicativo de desgaste na zona de transição entre as camadas controle do estresse de tensão e semi condutiva em diferentes partes da bobina.

O PRPD, Figura 7, obtido em laboratório mostra uma assimetria em favor de descargas positivas, ocorrendo durante o meio ciclo negativo de tensão, combinadas com uma forma arredondada.

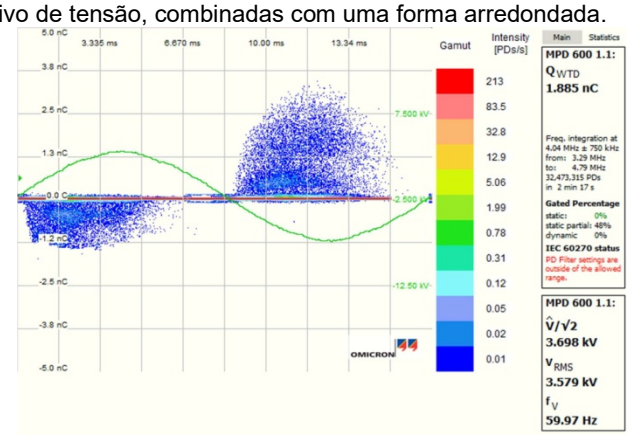


Figura 7 - PRPD obtido em laboratório para descargas corona.

3.4 Descargas de Ranhura

Descargas de ranhura em hidrogeradores ocorrem quando o revestimento da parte semicondutiva na ranhura se danifica devido vibração da barra ou bobina na ranhura. O PRPD é caracterizado por uma assimetria em favor das descargas positivas, ocorrendo durante o meio-ciclo negativo de tensão, combinado com uma forma triangular, conforme ilustrado na Figura 11.

Este defeito foi simulado em laboratório através do desgaste abrasivo de uma região retangular de 12 cm x 05 cm da tinta semicondutiva do lado interno da bobina, conforme Figura 8. O PRPD obtido em laboratório é apresentado na Figura 9, pode-se observar a assimetria em favor das descargas positivas, ocorrendo durante o meio-ciclo negativo de tensão, combinado com uma forma triangular.

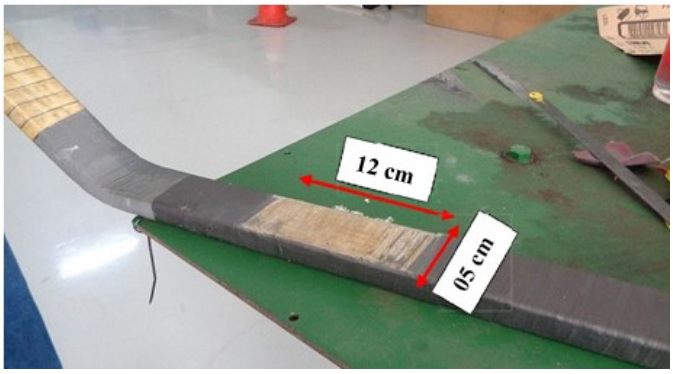


Figura 8 - Desgate de parte da camada semicondutiva para simular descargas de ranhura.

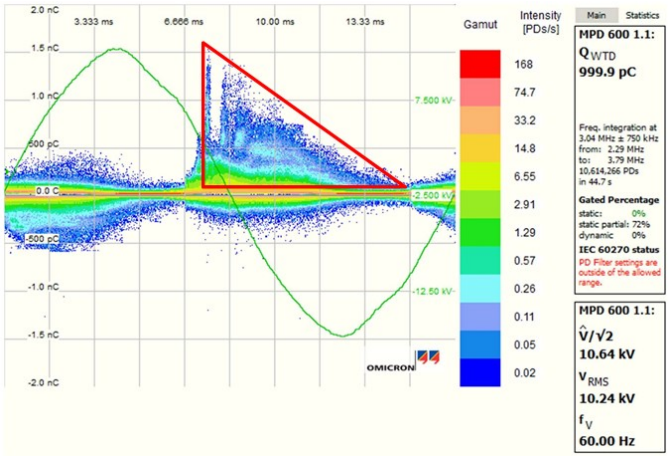


Figura 9 - PRPD obtido em laboratório de descargas de ranhura.

3.5 Descargas Barra-Barra (Tipo Gap)

Esse tipo de atividade ocorre entre duas barras nos terminais de saída do enrolamento. Ele ocorre quando o espaçamento de ar entre as barras é muito pequeno para suportar o estresse elétrico. Essas descargas podem ocorrer entre barras de diferentes fases ou entre a alta tensão e o um terminal neutro da mesma fase. A característica principal deste tipo de descarga é uma concentração horizontal de DP de amplitude relativamente constante, presente em ambas as polaridades de tensão, conforme ilustrado na Tabela 1.

Esta atividade de descarga foi simulada em laboratório através aplicação de tensão em uma bobina com uma falha na isolação entre as barras que compõem os condutores da mesma, conforme Figura 10 e a Figura 11 apresenta a ocorrência das descargas. O PRPD obtido em laboratório é apresentado na Figura 12, observa-se uma concentração horizontal de descargas de amplitude relativamente constante, presente em ambas polaridades de tensão.

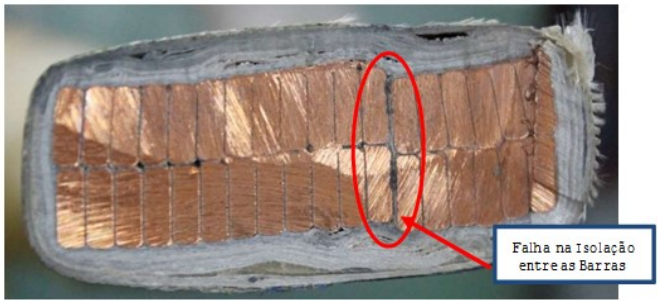


Figura 10 - Ocorrências das descargas entre barras com tensões diferentes.

Figura 11 - Ocorrências das descargas entre barras com tensões diferentes.

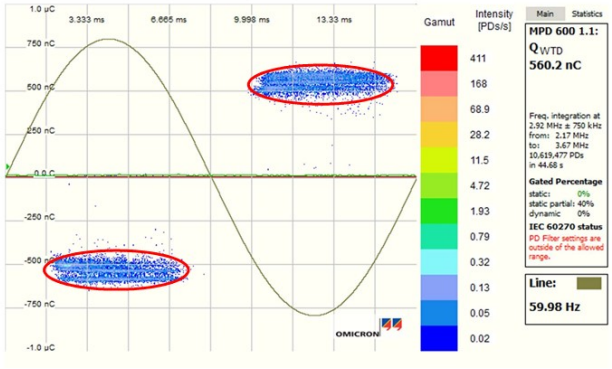


Figura 12 - PRPD obtido em laboratório para descargas tipo gap.

3.6 Descargas de Superfície

Descargas de superfície ocorrerão ao longo da região da bobina que sai da ranhura devido à contaminação da interface ar/isolação. Esse tipo de atividade pode ser muito esporádico, e depende bastante das condições de temperatura e umidade. O PRPD é caracterizado por uma concentração vertical de descargas, conforme ilustrado na Tabela 1.

Essa atividade de descargas foi simulada em laboratório através da contaminação da região da bobina que sai da ranhura com uma fita de cobre, conforme ilustrado na Figura 13. O PRPD obtido em laboratório é apresentado na Figura 14, nele pode-se observar uma concentração vertical de descargas.

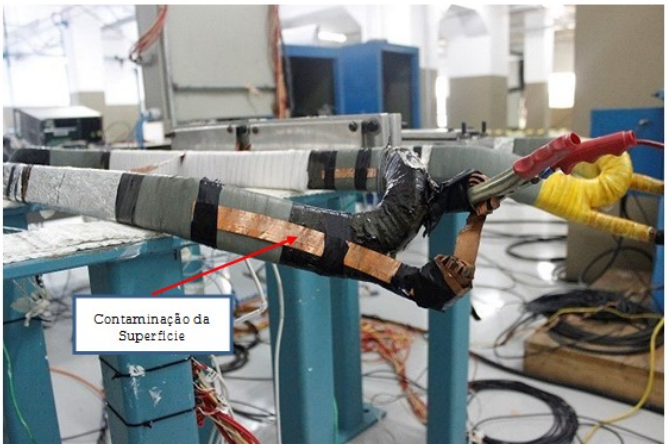


Figura 13 - Contaminação da superfície da bobina com uma fita de cobre.

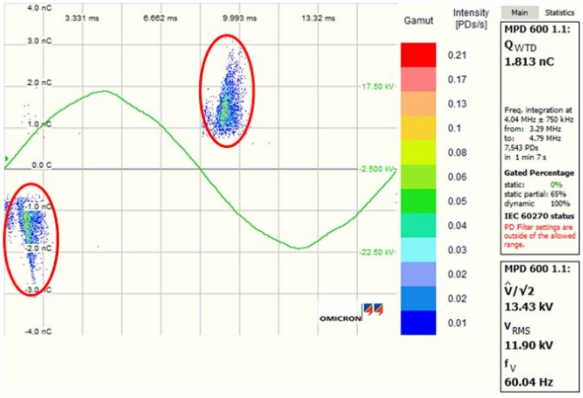


Figura 14 - PRPD obtido em laboratório para descargas de superfície.

4. CONCLUSÃO

O objetivo de simular em laboratório os defeitos descritos na IEC 60034-27-2 é dominar a característica das descargas para melhor entendimento e diagnóstico das medições realizadas em campo. Os próximos passos serão comparar medições em barras de diferentes máquinas que compõem o parque gerador da Eletronorte.

BIBLIOGRAFIA

[1] CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES, “Survey in Hydro Generator Instrumentation and Monitoring”, Working Group A1.40, 2017.

[2] M. E. Paulino, “Uso de Monitoramento On-line de Transformadores para Avaliação da Condição do Ativo”. O Setor Elétrico, ed. 107, 2014.

[3] G. C. Stone, “A Perspective on Online Partial Discharge Monitoring for Assessment of the Condition of Rotating Machine Stator Winding Insulation”, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 28, 2012, pp. 08-13.

[4] G. C. Stone, “Condition Monitoring and Diagnostics of Motor and Stator Windings – A Review”, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, No 6, 2013, pp. 2073-2080.

[5] INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION, “IEC 60270 High Voltage Test Techniques – Partial Discharges Measurements”, Suíça, 2000.

[6] INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION, “IEC 60034-27-2 Rotating Electrical Machines – Part 27-2: On-line Partial Discharges Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Electrical Machines”. Suíça, 2012.

[7] INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION, “IEC 60034-27 Rotating Electrical Machines - Off-line Partial Discharge Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Electrical Machines", 2007.

[8] F. de S. Brasil, P. R. M. Vilhena, V. Dmitriev, “Estudo de Técnicas de Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores.” In: V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, 2014, Foz do Iguaçu. V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, 2014.

[9] V. Dmitriev, Rodrigo M. S. de Oliveira, P. R. M. Vilhena, F. de S. Brasil, J. F. M. Modesto, R. F. Zampolo, “Analysis and Comparison of Sensors for Measurements of Partial Discharges in Hydrogenerator Stator Windings.” Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, v. 14, p. 1755-1760, 2015.

[10] MCDERMID, W.; BLACK, T. Tracking stator bar condition by on-line partial discharge measurements, Electrical Insulation conference, Annapolice Maryland, 5-8 June, 2011.

1.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Fernando de Souza Brasil, nascido em Belém-PA no ano de1983.
Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2016), Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2013), Especialista em Engenharia de Produção pela Universidade do Estado do Pará (2012), Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2006) e Licenciatura Plena em Matemática pela Universidade do Estado do Pará (2005). Atualmente é Engenheiro de Manutenção Elétrica das Centrais Elétricas do Norte do Brasil - Eletrobras Eletronorte e Professor do curso de Engenharia Elétrica na Faculdade FACI Wyden. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando nas áreas de manutenção preditiva de equipamentos de alta tensão de subestações e usinas hidrelétricas.

Paulo Roberto Moutinho de Vilhena, nascido em Macapá-AP, no ano de 1981. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2005), graduação em Tecnologia em Informática pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (2002), especialização em Engenharia de Sistemas pelo CentroUniversitário do Estado do Pará (2005) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2008). Atualmente é Engenheiro de Manutenção Elétrica das Centrais Elétricas do Norte do Brasil. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. Atualmente, também é aluno de doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará (UFPA/PPGEE).

Victor Dmitriev

Possui graduação em Engenharia Elètrica - Bauman Moscow State Technical University (1969), mestrado em Sistemas de Alta Potencia - Bauman Moscow State Technical University (1971) e doutorado em Dispositivos de microondas - Bauman Moscow State Technical University (1977). Atualmente é professor titular da Universidade Federal do Pará. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Teoria Eletromagnetica, Microondas, Propagação de Ondas, Antenas, atuando principalmente nos seguintes temas: cristais fotonicos, nanoplasmonica, nanoantenas, propagação de ondas eletromagnéticas, nanoeletronica e nanofotonica, simetria e teoria de grupos aplicados a electromagnetismo. Coordenador do laboratório ``Nanoeletronica e nanofotonica`` da faculdade de engenharia elétrica da UFPA.