



GRUPO - 001

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA- GGH

MÉTODO DE RECUPERAÇÃO DAS AVARIAS ACOMETIDAS PELO EFEITO CORONA NA SUPERFÍCIE DA ISOLAÇÃO DE BARRAS ESTATÓRICAS DE HIDROGERADORES – UMA VISÃO PRÁTICA

Milton Luiz Gil Romano(*)
COPEL

Everaldo Gaspareto
COPEL

João Paulo de Sousa
COPEL

RESUMO

O objetivo deste estudo é apresentar um procedimento para recuperação dos danos provocados pelo fenômeno do Efeito Corona (EC) na superfície da isolação de barras estatóricas. Para validação, foi realizada a recuperação do barramento estatórico de hidrogeradores síncronos. Como ferramenta de diagnóstico, utilizou-se a medição das descargas parciais (DP) e a comparação do levantamento das barras que sofreram a intervenção entre as grandes manutenções das unidades.

Os resultados são apresentados em forma de tabelas e gráficos. Sendo que nas medições de descargas parciais, efetuados antes e após o procedimento de recuperação, nota-se uma redução nos valores de magnitude das DPs dos geradores estudados. Também houve uma redução na quantidade de pontos recuperados. Além de uma redução no grau da intensidade das avarias causadas pelo EC.

PALAVRAS-CHAVE

Descargas Parciais, Efeito Corona, Cabeça Bobina, Proteção Anticorona.

1.0 - INTRODUÇÃO

Hidrogeradores são máquinas rotativas projetadas para trabalhar durante um longo tempo. No entanto, sua vida útil pode ser comprometida devido aos diversos tipos de falhas como, curto entre fase e terra ou entre fases. A estrutura mais frágil destas máquinas são os isolamentos das bobinas estatóricas, que são formadas por barras estatóricas. Nessas estruturas ocorre a maioria dos problemas que comprometem gradualmente o funcionamento das máquinas.

As barras estatóricas são constituídas por condutores ou barras menores de cobre isoladas entre si. Geralmente, o sistema isolante utilizado entre estas barras menores são um impregnado de mica-epóxi, a Figura 1 apresenta as características construtivas e de isolação de uma barra estatórica. A interligação das barras para formação das bobinas é denominada cabeça de bobina. As cabeças de bobinas trabalham com elevados campos elétricos, e por isso sofrem uma aceleração no envelhecimento da isolação e conseqüentemente na formação de avarias, que podem provocar falhas no estator da máquina. Estas avarias, geralmente são localizadas entre a camada de verniz e o condutor elementar, entre a camada de pintura semicondutora e a isolação principal. Dessa forma, há um aumento da degradação da isolação e formação de descargas pelo EC nesta região. É caracterizado por descargas parciais que ocorrem no ar e partem de pontas agudas em eletrodos metálicos, ou seja, descarga ponta plano. Para que ocorra este tipo de descarga é necessário que haja dois fatores: Campo elétrico elevado e elétrons livres suficientes para iniciar a formação da descarga [11].

Nos geradores síncronos, uma caracterização do EC ocorre na transposição das camadas condutivas e semicondutivas, estas camadas são chamadas de proteção anti-corona, ou luva anti-corona, por esta hipótese os elementos de prensagem do núcleo, dedos de pressão e tirantes de aperto tem uma distância mínima de acordo

(*) Rua conselheiro Jesuíno Marcondes, n° 520 – Apto 23 - Bloco 2 – CEP 85015-390 Guarapuava, PR, – Brasil. Tel: (+55 42) 3664-1516 – Fax: (+55 42) 3664-1503 – Email: milton.romano@copel.com

com o nível de tensão da máquina, formando um capacitor entre a superfície da barra e o dedo de pressão, conforme representado na Figura 2.

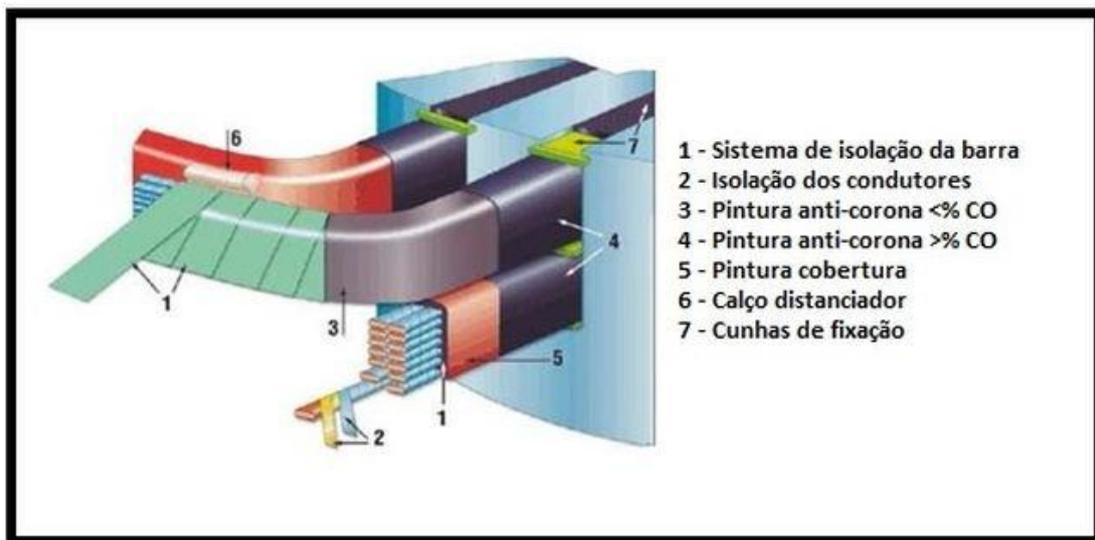


FIGURA 1 - Materiais que compõe uma barra estática.

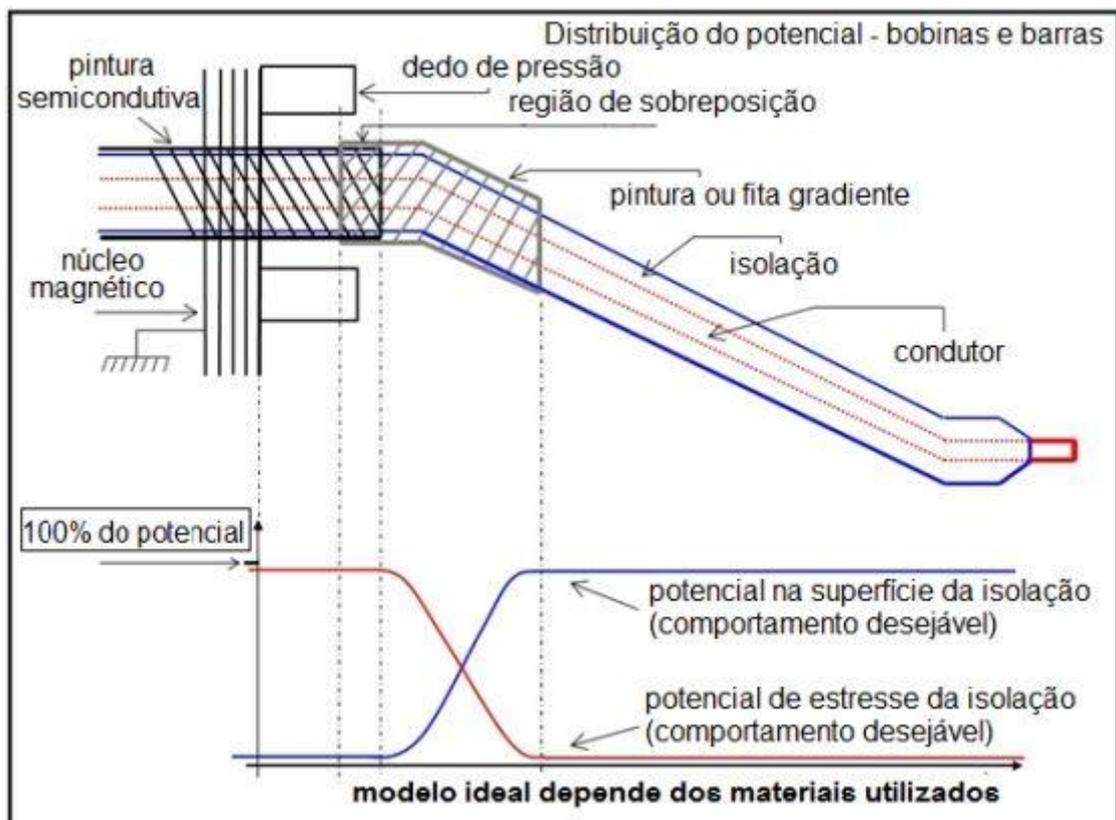


FIGURA 2 - Delimitação da área de pintura da cabeça de bobina.

A descarga parcial é definida pela norma IEC 60270, como uma descarga elétrica localizada que curto circuita parte da isolamento entre condutores, e que pode ou não ocorrer adjacente a um condutor. As descargas parciais são, em geral, consequência de concentrações de campo elétrico localizado no isolamento ou sobre a superfície do isolamento. Geralmente, essas descargas aparecem como impulsos tendo uma duração inferior a 1 ms [10]. O surgimento das descargas parciais (DP) é indicativo da ocorrência de falha no sistema de isolamento. Esse fenômeno contribui para o processo de degradação do material afetado, acelera o aparecimento de novas DP e pode fazer com que diminua o tempo de vida útil do equipamento. Assim, o estudo das DP constitui uma importante ferramenta para a análise da qualidade dos equipamentos de alta tensão. As descargas parciais podem ocorrer em vazios ou cavidades de isolantes sólidos (papel, poliéster, micas, resinas), em bolhas de ar em isolantes líquidos ou em torno de um eletrodo [3, 16].

Grandes alterações no dielétrico são refletidas na atividade de DP dentro do isolamento. Desta forma, as medições podem facilitar no reconhecimento de falhas incipientes no mesmo. Apesar de não sofrer uma solitação elétrica elevada, o isolamento se degradará naturalmente. Só será possível identificar a velocidade em que a degradação ocorrerá se houver um acompanhamento periódico das suas condições internas. Ao longo de uma barra, a descarga parcial pode ocorrer internamente, através de lacunas existentes no meio dos condutores, entre condutores e isolamento terra, entre isolamento terra e a camada semicondutora ou nas superfícies externas [17]. Por isso, para que haja confiabilidade do sistema isolante, as manutenções das mesmas devem ser periódicas, de acordo com os níveis e as incidências das descargas [6]. Ver Figura 3.

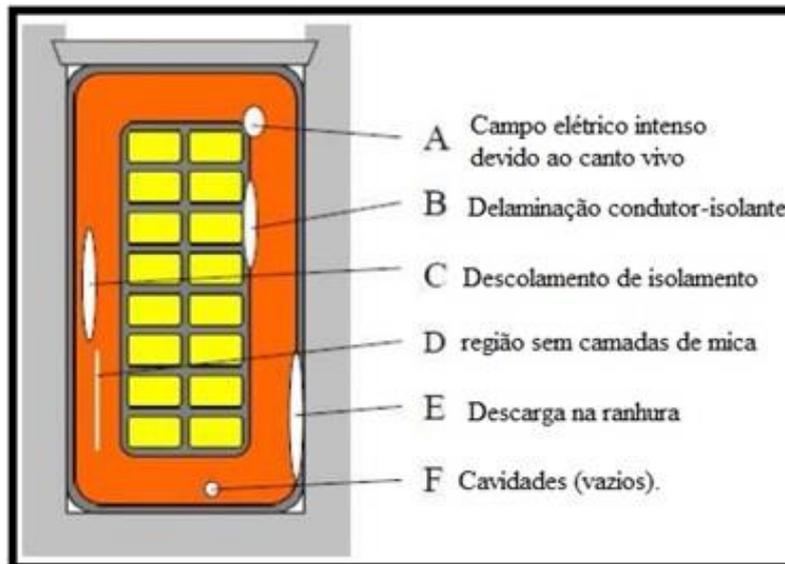


FIGURA 3 – Barra em corte identificado os pontos de descargas parciais.

De forma geral, alguns padrões de mapas de DP já foram entendidos pela ciência que estuda esse fenômeno. Por exemplo, quando padrões de DP são simétricos, ou seja, o padrão é o mesmo seja no ciclo positivo como no ciclo negativo da tensão, sabe-se que a atividade de DP ocorre dentro do isolamento e não no condutor ou na terra. Quando os padrões de descargas não são simétricos, diz-se que as descargas ocorrem entre a superfície do isolamento e a parte metálica aterrada, denominada descargas na ranhura. Nesse caso, além de ser assimétrica, há uma predominância de atividade durante o ciclo negativo da tensão. De um modo geral, as DP podem ser classificadas em três grupos: descargas parciais internas, descargas parciais superficiais e descargas corona [3].

- a. Descargas parciais internas: São descargas causadas por cavidades existentes dentro do composto isolante. Tais cavidades são formadas durante o processo de fabricação. Apesar de evitar ao máximo que tais cavidades apareçam na fabricação, não se consegue eliminá-las por completo. Portanto, uma determinada presença de descargas parciais em sistemas isolantes novos é aceitável conforme a norma IEC60034-27-2 [3].
- b. Descargas parciais superficiais: Descargas de superfície ocorrem quando o valor do campo elétrico em uma superfície rompe o limite de rigidez dielétrica do gás ao seu redor, ou seja, do revestimento semicondutor da barra estatórica, localizado na região da cabeça da bobina. Esse tipo de DP geralmente pode provocar falhas entre fase e terra, tendo um processo erosivo lento [3].
- c. Descargas corona ou Efeito Corona: ocorre quando o gás próximo a um condutor exposto se ioniza, produz descargas parciais visíveis em máquinas rotativas. Nestas, quando refrigeradas a ar, há a produção de ozônio, que acelera a decomposição da isolação. Neste caso, um pequeno anel de pó branco surge no ponto de saída das barras das ranhuras, facilmente identificável conforme Figura 4 [12].

Portanto, é reconhecido que geradores que possuem um elevado índice de DPs e evidência da presença de EC, terão sua vida útil reduzidas de forma significativa. Então, um procedimento de manutenção deve ser aplicado para pelo menos mitigar os danos causados pelas descargas parciais, a ponto de não comprometer a vida útil do equipamento. Pois, estatisticamente, as falhas na isolação da barra estatórica, representam 56% dos defeitos em hidrogeradores. Sendo que um terço dos mesmos é relacionado ao envelhecimento da isolação, ou seja, redução da vida útil [4].

A redução da vida útil do enrolamento possui diversos fatores, são eles: Modo de operação, carregamento, condições mecânicas, vibração, contaminação e falhas internas decorrentes do processo de fabricação. Portanto, a vida útil destes equipamentos está diretamente associada ao plano de manutenção e qualidade da execução a ele associado [13].



FIGURA 4 - Localização do EC na barra estática.

2.0 - PROCEDIMENTO DE RECUPERAÇÃO DA PINTURA ANTI-CORONA

O procedimento de recuperação trata das avarias oriundas da ocorrência do EC em barras estáticas de hidrogeradores síncronos. Para validar o procedimento, coletaram-se dados por meio de medição das descargas parciais dos geradores, antes e após a intervenção. Além de um controle da quantidade de barras recuperadas entre as grandes manutenções. Para verificação do nível de incidência do EC no gerador, foi definida uma classificação quanto ao nível de incidência do fenômeno. A definição tomou como base a presença de ácido nítrico na região da luva anti-corona e o grau de degradação da superfície da mesma. Para equalizar a análise, foi desenvolvido um fluxograma para avaliação do nível de incidência de EC a ser seguido conforme Figura 5.

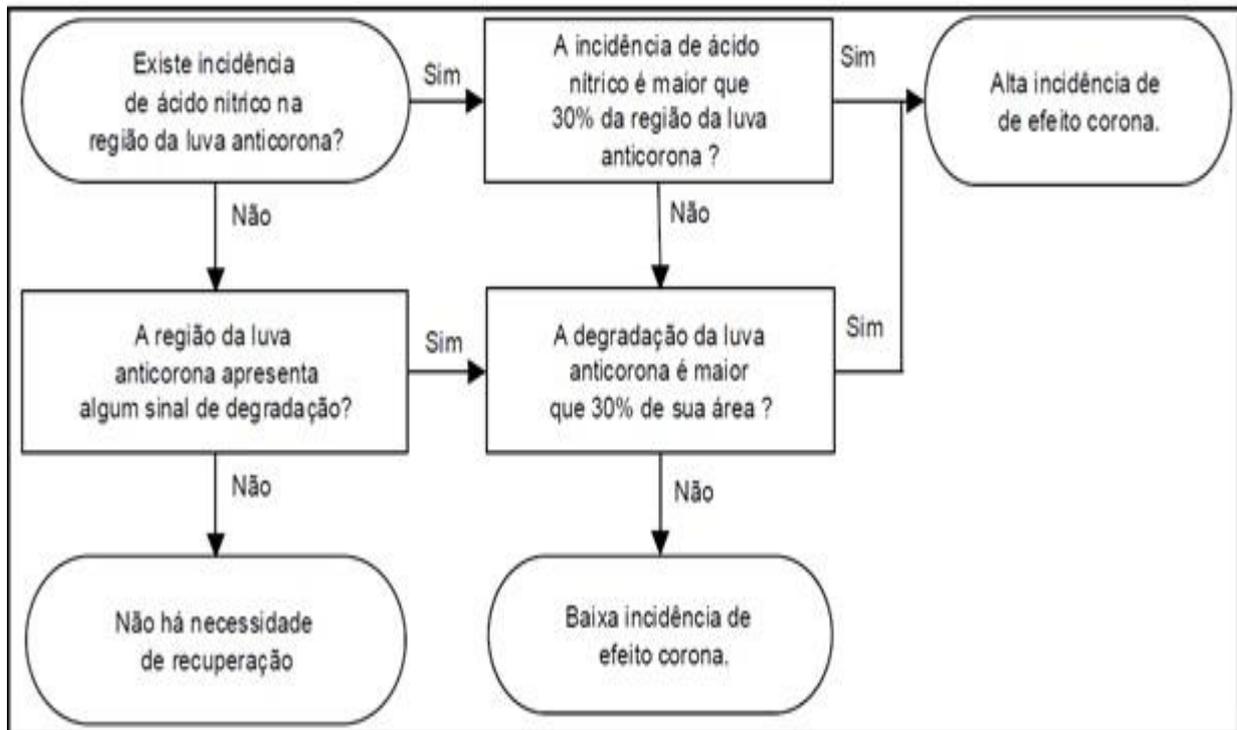


FIGURA 5 - fluxograma para avaliação do nível de incidência

Efetuada a classificação das barras acometidas pelo EC, há evidências quanto ao aspecto de evolução e de grau de desgaste das barras estáticas. Definiu-se então proceder à classificação quanto ao nível de evolução e agressão do fenômeno. As denominações escolhidas foram baixa e alta incidência. Para cada classificação, foi definida uma metodologia de recuperação, que visa reestabelecer as características de isolamento da superfície da barra do estator.



FIGURA 6 – Classificação do EC nas Barras (A) Baixa Incidência / (B) – Alta Incidência

2.1.1 Procedimento de Recuperação em Barras com Baixa Incidência do EC – Figura 6 (A):

1. Proceder à remoção do material degradado pelo EC;
2. Retirar o material degradado com lixa de óxido de alumínio, de forma a deixar a superfície uniforme;
3. Limpar da área tratada com panos e álcool isopropílico para retirar sobras e resíduos do lixamento.
4. Realizar delimitação da área que receberá nova pintura com verniz de acabamento;
5. Aplicar o verniz de acabamento, seguindo orientação do fabricante quanto ao tempo de cura;
6. Aplicar o verniz de forma a deixar a superfície o mais uniforme possível;
7. Aguardar a cura total do verniz para liberação da barra.

2.1.2 Procedimento de Recuperação em Barras com Alta Incidência do EC – Figura 6 (B):

1. Proceder à remoção do material degradado pelo EC;
2. Retirar o material degradado com lixa de óxido de alumínio, de forma a deixar a superfície uniforme e expor as camadas já existentes do acabamento semicondutivo e condutivo (Figura 7 - A);
3. Limpar da área tratada com panos e álcool isopropílico para retirar sobras e resíduos do lixamento.
4. Realizar delimitação da área que receberá nova pintura com verniz condutivo;
5. Aplicar o verniz condutivo de forma a deixar a superfície o mais uniforme possível, garantindo o contato da nova camada com a camada antiga (Figura 7 - B);
6. Realizar delimitação da área que receberá nova pintura com verniz semicondutivo;
7. Aplicar o verniz semicondutivo de forma a deixar a superfície o mais uniforme possível, garantindo o contato da nova camada com a camada antiga (Figura 7 - C);
8. Aplicar o verniz de acabamento, de forma a deixar a superfície o mais uniforme possível (Figura 7 – D);
9. Aguardar a cura total do verniz para liberação do equipamento para montagem.

Observando os procedimentos acima, nota-se que as barras com baixa incidência de EC, sofrem o desgaste da barra somente na pintura de acabamento e na parte semicondutiva. Enquanto as barras com alta incidência de EC necessitam recuperar a luva anti-corona, criada a partir da sobreposição das tintas condutivas e semicondutivas.

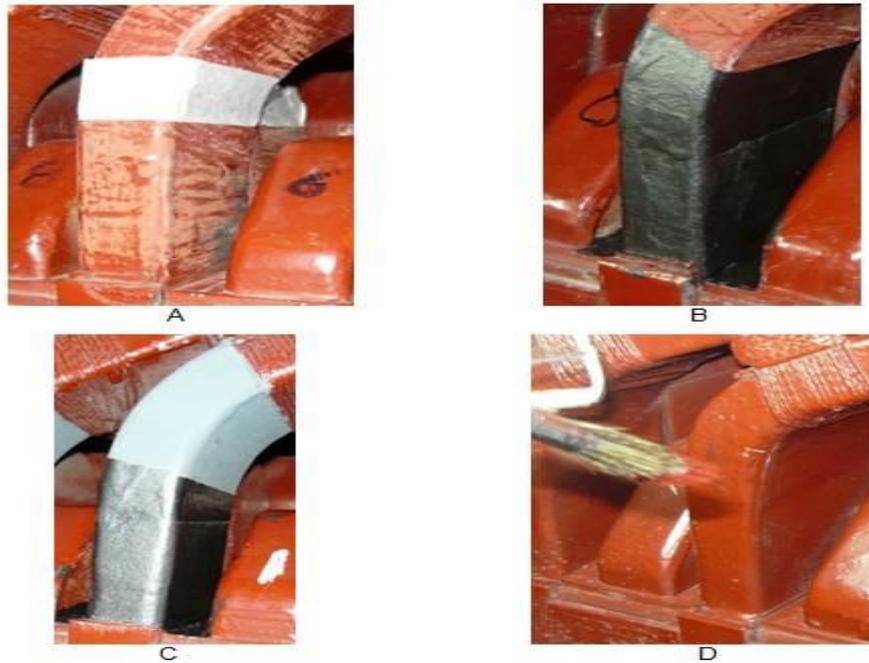


FIGURA 7 – Etapas do Processo de Recuperação da Barra Estática

3.0 - RESULTADO

As unidades recuperadas pelo procedimento possuem mais de 10 anos de funcionamento e sofrem com o desgaste causado pelo EC desde o início de sua operação. Além disso, as mesmas possuem um regime de operação irregular devido as características de vazão do rio onde os geradores estão construídos. Ou seja, há uma alta incidência de partidas e paradas. As características elétricas destas unidades são:

- ✓ Potência Nominal: 66,76MVA;
- ✓ Tensão Nominal: 13,8 kV;
- ✓ Corrente Nominal: 2793A;
- ✓ Frequencia Nominal: 60Hz;
- ✓ Ligação do Enrolamento: Estrela;
- ✓ Número de Fases: 03;
- ✓ Tipo de Regime: Contínuo.

De acordo com o que foi apresentado, é possível notar que devido as características de funcionamento e os problemas enfrentados desde o início da operação das unidades, o isolamento das barras estáticas teriam uma redução na sua vida útil. Por isso nestas unidades, foi aplicado o procedimento para recuperar o estator dos desgastes causados pelo EC. Para demonstrar os resultados, é apresentado a tabulação da quantidade de pontos recuperados, durante duas grandes manutenções de uma das unidades do complexo. Os resultados estão no Quadro1 e nas Figuras 8 e 9.

Localização do Ponto Danificado:	Ano da Grande Manutenção	
	2013	2016
Superior:	133	105
Inferior	122	112
Total de Pontos Recuperados:	255	217

QUADRO 1 - Quantidade de pontos recuperados entre grandes manutenções.

Nota-se que entre a grande manutenção de 2013 e a grande manutenção de 2016, houve uma redução de 15% na quantidade de pontos recuperados, além de uma redução expressiva da magnitude das DPs.

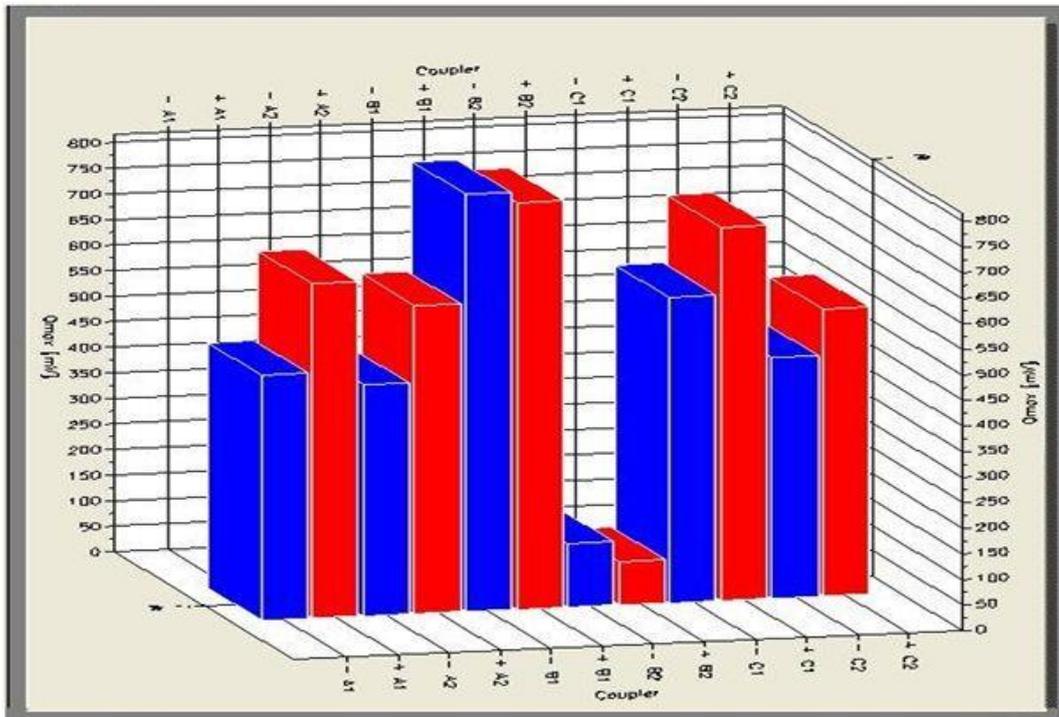


FIGURA 9 - Gráfico DP antes de implementar o procedimento.

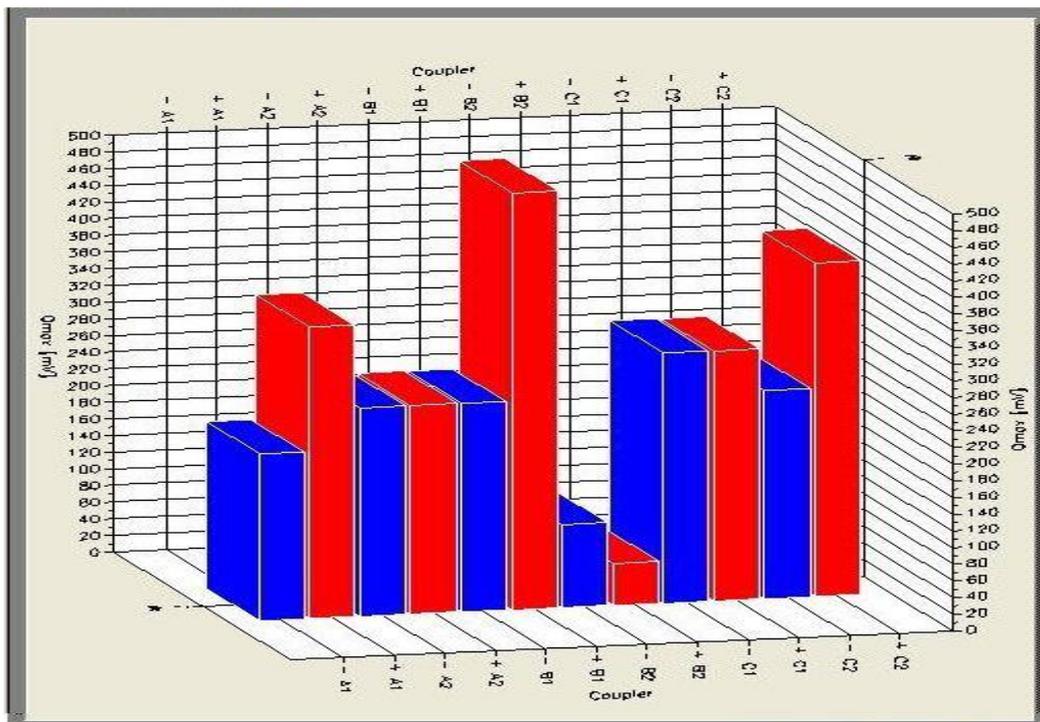


FIGURA 8 - Gráfico DP após de implementar o procedimento

4.0 - CONCLUSÃO

É fato que o Efeito Corona causa uma degradação que compromete a superfície da isolamento das barras estatóricas. Este efeito se concentra no ponto conhecido como luva anticorona (alívio de tensão). Observando os resultados, é possível afirmar que o procedimento utilizado para recuperar a degradação foi efetiva.

O procedimento foi aplicado nas 4 unidades do complexo. Os resultados apresentados referem-se a unidade que obteve o pior índice quanto a redução de pontos recuperados. No entanto, nesta unidade, na segunda intervenção, todos os 217 pontos tratados foram de baixa incidência, bem diferente do que houve na primeira recuperação.

Quanto aos ensaio de descargas parciais, houve a indicação de que as mesmas diminuíram após a recuperação das barras. Isso indica que houve uma recuperação efetiva das características técnicas da superfície do sistema isolante das barras estatóricas. Como consequência, houve uma prorrogação na vida útil do equipamento.

Assim, o desenvolvimento de uma metodologia padronizada de análise recuperação, incluindo sua validação por meio de resultados de valores numéricos e registros fotográficos, comprova a eficácia do procedimento desenvolvido. Vale ressaltar, que o procedimento restabeleceu as características técnicas do projeto do sistema isolante das barras estatóricas e minimizou a magnitude das descargas parciais e o EC.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ABNT, NBR. 5456. Eletricidade Geral–Terminologia, 2010.
- (2) ABNT, NBR. 5462. Confiabilidade e manutenibilidade, 1994.
- (3) ALVES, M. P., Caracterização de Padrões de Descargas Parciais em Hidrogeradores Utilizando Técnicas de Inteligência Computacional. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2015.
- (4) BRUETSCH, Rudolf et al. Insulation failure mechanisms of power generators. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 24, n. 4, p. 17-25, 2008.
- (5) CARVALHO, Alencar Ribeiro .Contribuições para projeto de Geradores Síncronos de Grande Porte. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá.
- (6) EMERY, F. T. Partial Discharge, Dissipation Factor, and Corona Aspects for High Voltage Electric Generator Stator Bars and Windings. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Charlotte, v. 12, n. 2, p.347-361; Abril 2005.
- (7) FITZGERALD, A. E: Máquinas Elétricas - 6ª ed. – Porto Alegre: Bookman, 2006.
- (8) FOGAÇA, Alvaro José Noé. EFEITO CORONA EM BOBINAS ESTATÓRICAS–UMA ABORDAGEM NUMÉRICA. 2003. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná.
- (9) HILDINGER, J. Johnny Rocha E. Thomas; ALVES, Egidio José Faria Cesar AP. O IMPACTO DA ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DE HIDROGERADORES NO SEU CUSTO.
- (10) IEC, IEC Standard. 60270, High Voltage Test Techniques–Partial Discharge Measurements. International Electrotechnical Commission, 2000.
- (11) 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.
- (12) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE P1434 Guide for the Measurement of Partial Discharge in AC Electric Machinery. USA: 2014.
- (13) MAURO, Marco Aurélio Siqueira. Análise de vida útil de isolamento de geradores com enrolamento de armadura refrigerado a água. 2015. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.
- (14) MARQUES, A.P., SÁ, L.C.R., Avaliação de Envelhecimento em Barras de Estator de Hidrogeradores, In: XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo de Estudo de Geração Hidráulica – GGH, Foz do Iguaçu, Brasil, 1999.
- (15) Stone, Greg C., Culbert Ian, Boulter, Edward A., Dhirani, Hussein - Electrical Insulation for Rotating Machines, Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair, IEEE Press Willy 2014
- (16) SWINKA FILHO, VITOLDO. Imagens de Defeitos por descarga parcial estimulada por raio X pulsado em materiais dielétricos poliméricos. 2000. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

(17) VILHENA, Paulo Roberto Moutinho de. Sistema para Detecção, Localização e Monitoramento de Descargas Parciais em Estatores de Hidrogeradores. 2015. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Milton Luiz Gil Romano. Nascido em Cornélio Procópio, PR, em 08 de outubro de 1976. Técnico Eletrotécnico, pela UTFPR, 2006. Tecnologia Eletrotécnica, ênfase automação industrial, pela UTFPR, 2006. Engenharia Elétrica, pela Faculdade Guarapuava, 2016. Supervisão Técnica de manutenção Eletroeletrônica da UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Neto.