



**XXIII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GGH/13  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - I**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**EXPERIÊNCIA COM MEDIÇÕES DE DESCARGAS PARCIAIS EM ENROLAMENTOS DE ESTADORES DE GRANDES HIDROGERADORES**

**Milene A. S. Teixeira(\*)**

**Mladen Sasic**

**Greg C. Stone**

**Howard G. Sedding**

**Qualitrol Iris Power**

**RESUMO**

Testes online de descargas parciais (DP) é o método mais usado para avaliar a condição da isolação das barras e bobinas dos enrolamentos dos estadores em hidrogeradores, e é rotineiramente usado na maioria das máquinas do mundo com potência igual ou maior que 20MVA. O teste de descargas parciais pode encontrar mecanismos de falha, por exemplo, como barras soltas, deterioração térmica da isolação e contaminação dos enrolamentos. O método mais utilizado emprega capacitores de 80 pF como sensores de DP instalados no enrolamento do estator. Mais de 5000 hidrogeradores no mundo utilizam estes sensores.

Este método detecta DP na faixa de frequência de 40-350 MHz (faixa de frequência muito alta ou VHF), diferentemente dos métodos utilizados no passado nos quais faixas de frequências < 1 MHz (baixa frequência ou LF) também eram usados. Este artigo é direcionado para detecção de descargas parciais (DP) em hidrogeradores entre 500 MW e 900 MW que podem ser encontrados no Canadá, Brasil e China, incluindo DP em um gerador de 737MVA no Brasil.

**PALAVRAS-CHAVE**

Descargas parciais, teste online, grandes hidrogeradores.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Ao longo dos últimos 25 anos, a detecção online de descargas parciais tornou-se um método padrão para avaliar a condição do isolamento de alta tensão em geradores e motores maiores que 6 kV. No método mais comum, sensores capacitivos de 80 pF PD foram instalados permanentemente em mais de 15.000 máquinas, das quais mais de 5.000 são hidrogeradores. Este método, muitas vezes chamado de ensaio PDA, é descrito em detalhe em [1, 2], e também em termos mais gerais pelas normas IEEE 1434 e IEC 60034-27-2 [3, 4].

Ao usar sensores de DP em 80pF, o método trabalha nas banda de frequências de 40-350 MHz, também chamada de banda de frequência muito alta (VHF) [2]. É de conhecimento de todos que os pulsos de DP são atenuados através do enrolamento do estator, devido à indutância das barras do mesmo [3-5]. Assim DP geradas em trechos remotos da barra, ou seja, trechos mais distantes dos sensores, pode não ser detectadas eficientemente. E por isso algumas pessoas têm expressado preocupação em relação a eficácia dos sensores 80pF para a detecção de DP em grandes hidrogeradores maiores que 500 MVA. Em contrapartida, descargas parciais de hidrogeradores podem também ser medidas na alta frequência (HF) de 3-30 MHz. Nesta faixa de HF, DP não será tão atenuada, mas os sinais poderão ser misturado com outros ruídos, e portanto, mais propenso a falsas indicações de problemas no isolamento do estator. Este trade-off entre os métodos de VHF e LF é amplamente discutido em [3-5].

Este trabalho apresenta resultados de testes online de DP realizados nos maiores hidrogeradores do mundo, utilizando o método de VHF. Testes especiais usando sensores de 80 pF foram realizadas em 2003 ( e aqui apresentada pela primeira vez ) num hidrogerador 18 kV - 737 MVA, no Brasil. Ambos os testes, online e offline, foram realizadas no enrolamento do estator, com uma barra defeituosa, simulando um mecanismo de falha conhecido. Também são apresentadas as medições online de DP do próprio enrolamento. Além disso, os resultados obtidos ao longo dos últimos 20 anos em muitos hidrogeradores de 500 MW - 15 kV no Canadá são apresentados. Finalmente, alguns dados do maior hidrogerador do mundo ( 889 MVA , 23 kV ) , que está localizado na China também serão discutidos.

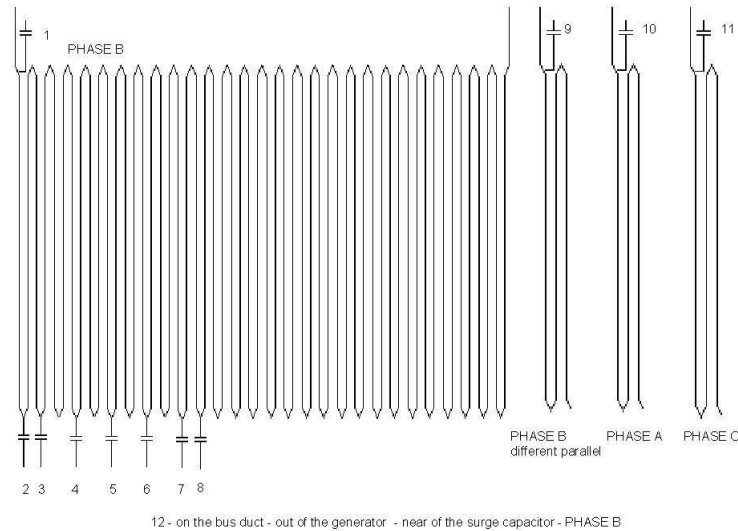


FIGURA 1 – Diagrama de enrolamento de um paralelo Fase B and localização dos sensores de DP.

## 2.0 - TESTES NO BRASIL

Oito sensores de 80pF foram temporariamente instalados em vários locais nos circuitos paralelos da fase B (Figura 1). Um sensor estava conectado na parte de alta tensão da barra, no barramento tipo anel. Os outros sete foram conectados na parte de baixo do enrolamento, nas conexões entre barras (onde foram isolados) no mesmo paralelo (Figura 1). Acoplador C1 opera na tensão fase-terra da máquina 10.4kV. Acopladores 2 a 8 trabalham progressivamente em tensões mais baixas, com o oitavo deles em 4.1 kV fase-terra, quando o gerador está em funcionamento normal. Sensores de 80pF foram também instalados na conexão dos paralelo da fase B até barra de saída (C12), assim como a conexão do barramento tipo anel até o paralelo da fase B (C9). Um sensor de 80pF foi conectado onde os anéis são conectados aos paralelos A e C (C10 e C11, respectivamente).

Em alguns testes, um pedaço de barra modificada (barra especial para o teste) estava conectada, temporariamente, na fase B, no mesmo local que C2 ou C8 (Figura 1). Essa barra foi modificada pela equipe da planta para gerar pulsos de alta amplitude oriundos na superfície da barra. A tensão de injeção de DP foi de 3,5 kV , e, então, a DP seria ativa, mesmo em serviço, quando conectado a C8 ( que opera a 4,1 kV ) . Isso serviu como uma fonte de PD bem definida tanto em teste online quanto em teste offline na fase B.

## 2.1 TESTES OFFLINE

Uma fonte de tensão AC foi usada para energizar uma fase. O neutro está isolado e as outras 2 fases estavam aterradas. Fase B foi medida para ter a tensão de injeção de DP (PDIV) de 6.5 kV. A figura 2 mostra os pulsos negativos e positivos medidos em 10.4 kV no acoplador C1, o sensor de DP que é normalmente instalado para este tipo de teste. Note que o tempo de subida é típico de descargas parciais medidas em hidrogeradores desse porte, 3 nano segundos ou mais.

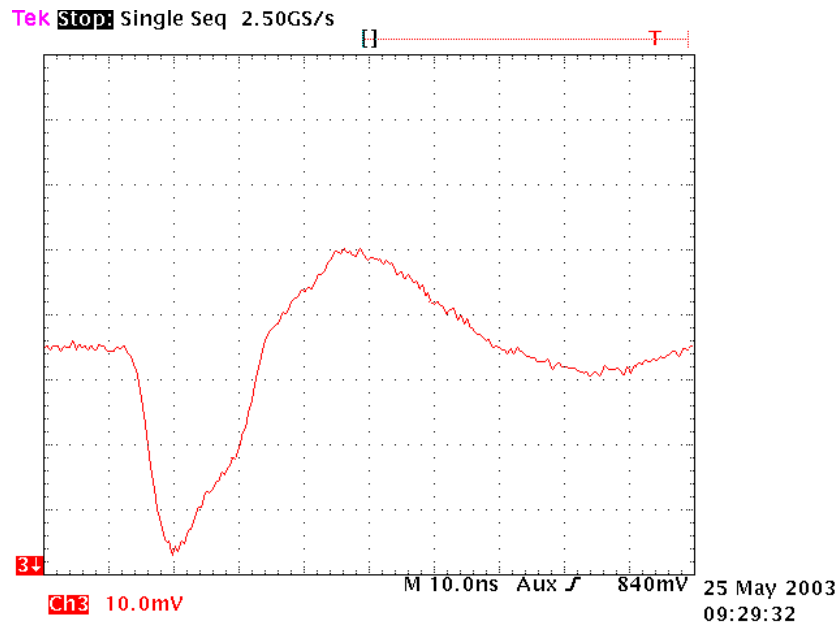


FIGURA 2 (A) - Pulsos de descargas parciais do enrolamento do estator. Pulsos negativos.

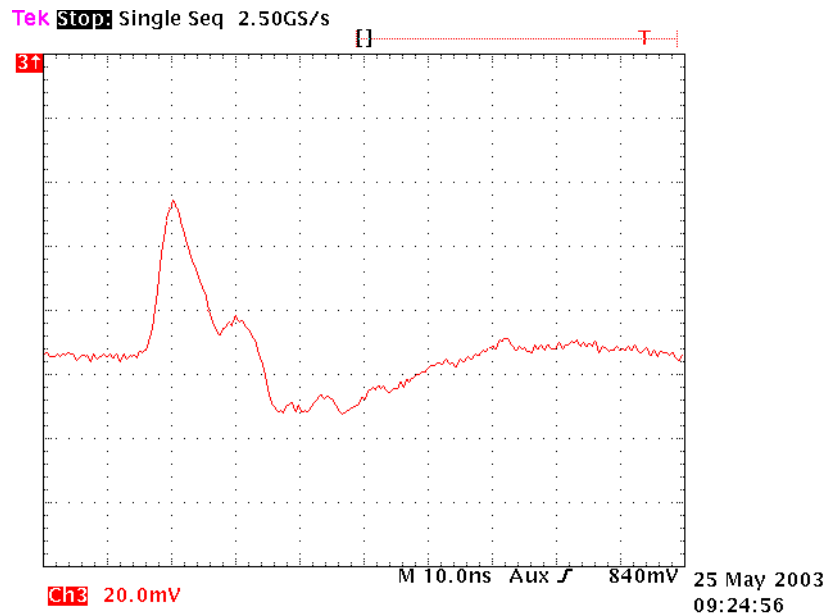


FIGURA 2 (B) - Pulsos de descargas parciais do enrolamento do estator. Pulsos positivos.

Então uma barra especial para o teste, atuando como fonte de descargas parciais, foi conectada na posição C2. Com essa barra especial no circuito, a PDIV foi medida em 4.5 kV, por causa desta barra especial. Com 5 kV aplicado na fase B (todas as barras estão na mesma tensão, incluindo a barra de teste especial), pulsos de DP com amplitude alta foram medidos em C2 (400mV, medidos com resistor de 50 ohm em osciloscópio TDS644B 1Ghz), com somente 100 mV detectados em C1. A figura 3 mostra a amplitude das descargas parciais (medidas por osciloscópio) em função do sensor na posição da fase B. Está claro que a maior descarga parcial foi a medida pelo sensor mais próximo da fonte de DP, embora alguns sinais em C8 podem ser por radiação direta da fonte de DP, a qual não ocorreria numa barra normal na ranhura do estator, dando uma resposta maior do que a normal em C8.

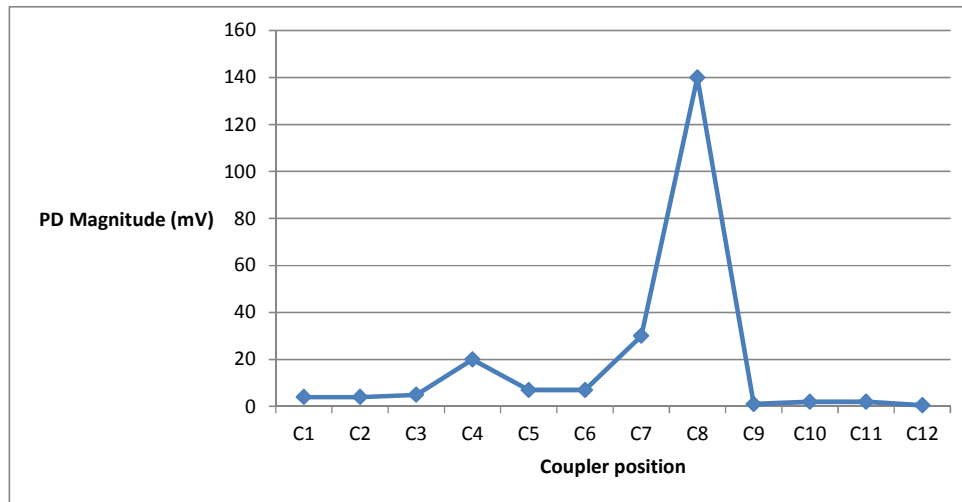


FIGURA 3 - Amplitude de DP versus localização dos sensores com fonte de DP no sensor C8.

Dados similares foram observados com a barra especial de teste na posição C8. A amplitude da DP detectada na barra especial (C8) estava em 140 mV, reduzindo para 30 mV quando medida em duas barras distantes (C7). Claramente, quanto mais distante a fonte de DP dos sensores, menor o sinal de descarga parcial detectado.

## 2.2 TESTES ONLINE

Inicialmente, o gerador estava operando a 740 MW e 102 MVar, e a barra especial de teste não estava instalada. C1 e C9 foram pareados para suprimir o ruído externo usando o método *time of flight* [1, 3, 4]. A Figura 4 mostra o gráfico de resolução por fase para os acopladores da fase B. C1 tem a DP mais alta, com Qm de 40 mv. Comparada a base de dados já publicada, a qual contém 400.000 resultados de testes [6], essa DP é considerada baixa. De acordo com a base de dados, o valor de 529 mv ou maior é considerado alto. A equipe de engenheiros da planta disse que possivelmente o enrolamento do estator estava em boa condição naquela época, logo esta avaliação estava consistente com o que mostrou o resultado do teste de DP. O Qm das descargas parciais em carga máxima medidas nas fases A e C (C10 e C11 respectivamente) estava 77 mV e 94 mV. No entanto, o esquema de rejeição de ruído associado ao teste PDA [3] não foi implementado para os dados nas fases A e C, desde que existia somente um único acoplador por fase.

A barra especial para teste, sendo fonte de DP usada para o teste offline, foi também conectada a posição C8 quando o gerador estava auto excitado, embora não conectado ao sistema. Quando o rotor estava em velocidade nominal, a corrente do rotor foi ajustada para gerar 11.2 kV fase-fase, isto é 6.5 kV fase-terra. Esta tensão é superior à PDIV da barra especial, mas abaixo da PDIV do próprio enrolamento. DP significativa foi medida por C8 adjacente a barra especial de teste, enquanto os outros acopladores mostravam menores amplitudes.

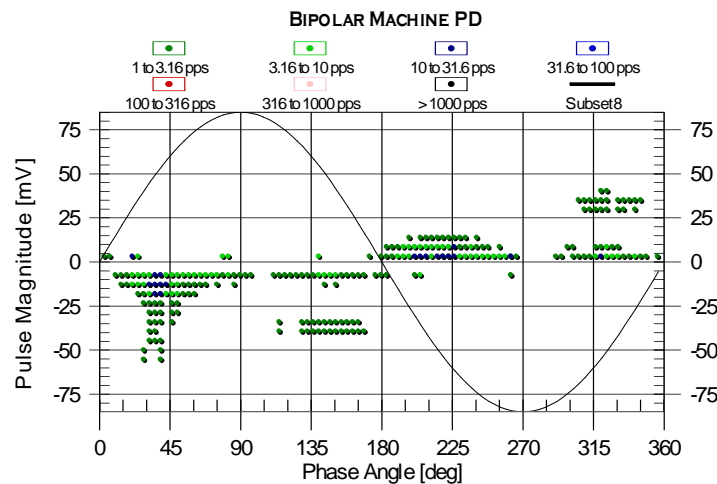


FIGURA 4 (A) - Fase B, DP do acoplador C1.

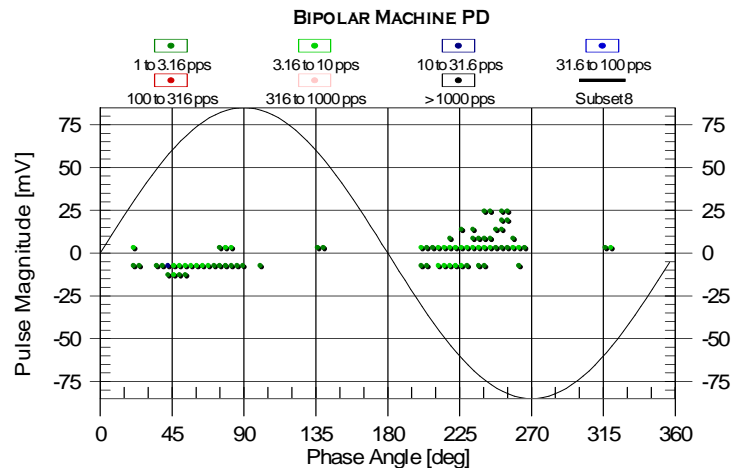


FIGURA 4 (B) - Fase B, DP do acoplador C9.

FIGURAS 4: Gráficos de resolução de fase de DP natural (isto é , a barra especial para teste não estava no circuito) da fase B para os dois acopladores (C1 e C9) instalados para rejeitar ruídos oriundos do sistema. (a) e (b) mostram DP dos sensores C1 e C9 respectivamente.

### 3.0 - TESTES NO CANADA

Sensores de 80pF tem sido instalados para a realização de testes de descargas parciais em hidrogeradores de 500MW por mais de 20 anos. Essas máquinas tem 8 paralelos por fase. Seguindo a prática da época, apenas 2 sensores por fase foram instalados. Os sensores eram instalados no final do barramento tipo anel, onde tinha-se os terminais A, B e C da máquina. Dos 11 geradores, o que apresentava DP mais baixa tinha Qm de 84 mV, dado este adquirido em 2014. Esta máquina foi rebobinada em 1986, e suas cunhas não foram reapertadas naquela época. O pior gerador apresentou Qm de 770 mV ( 10 vezes mais alto ), nos testes de 2014. Este valor é maior que 95% dos hidrogeradores da mesma faixa de tensão 15kV [5]. Figura 6 mostra o gráfico de resolução por fase desta máquina.

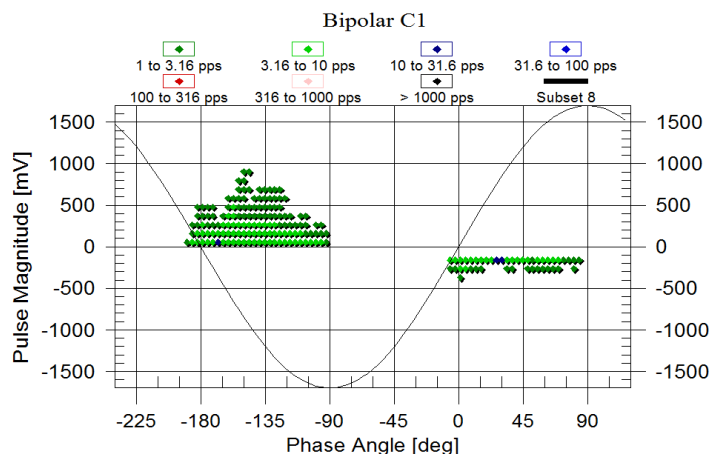


FIGURA 6 - Gráfico DP de um paralelo, fase C, do gerador com DP mais alta.

### 4.0 - TESTES NA CHINA

Sensores de 80pF tem sido instalados nos maiores hidrogeradores do mundo, na faixa de 889 MVA (812MW) em 23 kV. Ao invés de se instalar sensores em cada paralelo, a equipe da planta decidiu instalar 2 sensores por fase no barramento de saída do gerador, e o método *time of flight* foi usado para separar DP do estator dos ruídos. A figura 7 mostra DP e os ruídos oriundos do sistema da fase C enquanto o gerador estava operando a 23 kV e 245 MW. O Qm encontrado foi de 45 mV, o que era esperado pois o hidrogerador está em operação a pouco tempo, alguns meses. Note que a fonte de ruído proveniente do faiscamento do barramento blindado de saída é bem alta.

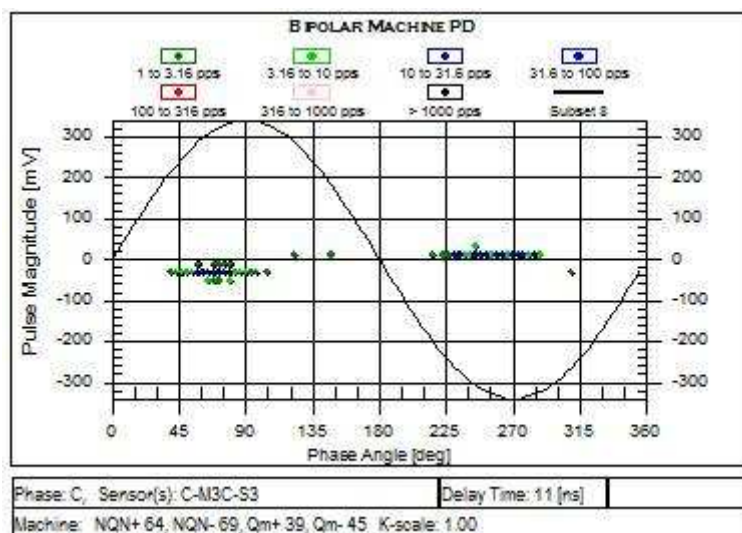


FIGURA 7 (A) - DP de um grande hidrogerador na China com sensores 80pF instalados.

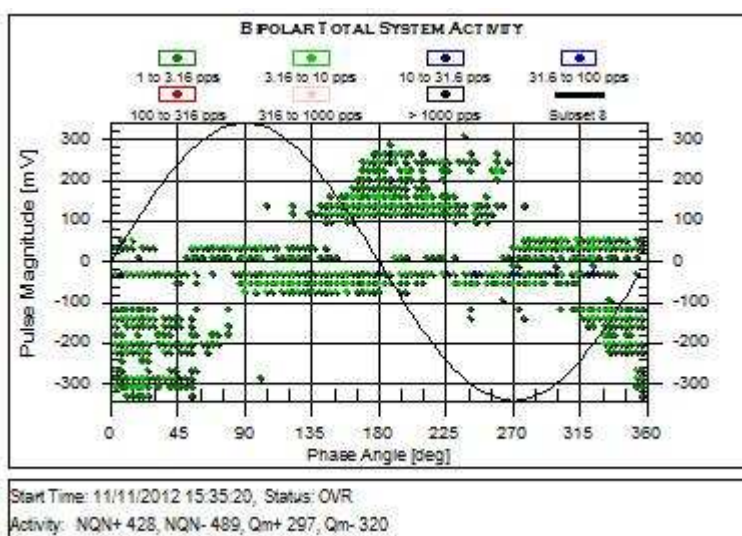


FIGURA 7 (B) - Ruídos do sistema de um grande hidrogerador na China com sensores 80pF instalados.

## 5.0 - ESCOLHA DO NÚMERO DE SENSORES DE DESCARGAS PARCIAIS

Normalmente DP apenas ocorrerá nas barras operando em tensão nominal ou próximas a elas, pois a amplitude do pulso de descarga parcial é fortemente afetada pela tensão na isolamento [1, 3-5]. Assim, qualquer teste online de DP só vai detectar deterioração do isolamento nos trechos das barras que trabalham com tensão mais alta (trechos próximos aos terminais de alta tensão). A condição de todas as barras do enrolamento só poderão ser avaliada com testes offline [1] e inspeção visual.

O objetivo principal de DP é detectar o envelhecimento da isolamento. A aceleração do envelhecimento é influenciada pela: temperatura (a qual é principalmente determinada pela corrente do estator), movimento mecânico (novamente determinada pela corrente), contaminação do enrolamento e tensão. Logo, se a corrente é a mesma em todas as barras, o envelhecimento térmico, mecânico e a vibração das barras do estator dentro da ranhura são definida pela corrente. Consequentemente esses fenômenos podem acontecer em qualquer barra, ou em qualquer lugar do enrolamento. Assim, num teste online de DP, a descarga parcial é considerada como um indicador da condição geral de todas as barras, onde as forças de envelhecimento são devido à corrente e a contaminação.

Envelhecimento elétrico puro (devido a DP) é limitado a ocorrer somente nas barras ligadas nos terminais de fase ou perto deles. Uma vez que apenas as barras próximas aos terminais são submetidas a maiores stress (alta tensão e corrente, e contaminação), então DP é tomado como um indicador da condição geral do enrolamento. Caso exista um defeito isolado localizado remotamente, longe dos terminais das fases, este não será detectado por nenhum outro teste online. Na realidade, partes diferentes do enrolamento vão envelhecer de formas diferentes. Portanto, haverá variação no grau de envelhecimento, e, assim, a DP das barras serão diferentes.

A quantidade de sensores de DP a ser instalados é um trade off entre custo, e desejo em se determinar a condição de cada barra de alta tensão da máquina. Dois sensores por fase é provavelmente pouco para ter uma amostra representativa sobre a faixa de envelhecimento de todas as barras. No entanto, a experiência no Canadá, descrito acima, demonstrou que, mesmo com um número limitado de sensores, uma avaliação geral da condição do enrolamento do estator pode ser obtida. Um sensor por circuito paralelo poderão ser muitos sensores. Além disso, a instalação de muitos acopladores de DP aumenta a complexidade da instalação. Doze sensores normalmente permitem aos usuários avaliar a condição geral do isolamento do enrolamento, monitorando cerca de 33-50% das barras de fim de fase na maioria dos grandes hidrogeradores. A evidência empírica sobre a validade desta abordagem é que a correlação entre os testes online de DP e a real condição do enrolamento de isolamento do estator é de 98,5% (precisão do teste).

## 6.0 - CONCLUSÃO

Descargas parciais tem sido coletadas e interpretadas em dezenas de grandes hidrogeradores de 500 MVA ou maiores. DP tem um padrão clássico e é correlacionada a condição da isolação dos enrolamentos dos estatores. Como esperado, sensores de 80pF podem detectar apenas PD que está acontecendo em algumas barras do estator. Assim, uma cuidadosa reflexão é necessária para definir o número de sensores exigido em cada gerador. Em princípio, através de métodos de HF (com base em sensores capacitivos com valor mais elevado) acredita-se aumentar a cobertura do enrolamento, porém estas técnicas estão mais susceptíveis a interferência elétrica e, portanto, podem reduzir a confiabilidade da medição e aumentar o risco de um resultado falso positivo. A vantagem do método de VHF é a redução do risco de falsas indicações de problemas no enrolamento do estator, devido à sua capacidade superior de suprimir o ruído.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Electrical Insulation for Rotating Machines (Second Edition), G.C. Stone, I. Culbert, E.A. Boulter and H. Dhirani, IEEE Press/Wiley, 2014.
- (2) M. Sasic, G.C. Stone, M. Teixeira, "Vinte E Cinco Anos De Experiência Em Teste Online De Descarga Parcial Em Hidrogeradores ", 2013, SNPTTE.
- (3) IEEE Standard 1434, Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery.
- (4) IEC Standard 60034-27-2, On-line Partial Discharge Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Electrical Machines.
- (5) G.C. Stone, "Importance of Bandwidth in the Measurement of PD in Operating Motors and Generators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, February 2000, pp. 1131 – 7.
- (6) V. Warren, "Partial discharge testing: a progress report", Proceedings of 2013 Iris Rotating Machine Conference.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

### **Milene de Araujo Soares Teixeira**

Engenheira Eletricista formada pelo CEFET-MG, pós graduada em Engenharia de Produção pela FEG-UNESP e Marketing pela FGV.

Desde de 2011 atuando como gerente de vendas Brasil na Qualitrol Iris Power, segmento de geração, e responsável pelo território sul (SP, MS, PR, SC e RS). Anteriormente trabalhou com equipamentos para siderurgia e papel e celulose.

Artigo publicado no XXII SNPTTE 2013 – Vinte e cinco anos de experiência em Teste Online de descarga parcial em hidrogeradores.

### **Greg C. Stone**

Possui mais de 20 anos de experiência em testes e enrolamentos de grandes motores e geradores. Com mais de 200 artigos técnicos publicados, ele contribuiu para a publicação dos livros "Handbook of Electrical Machines," e "Handbook to Access the Insulation Condition of Large Rotating Machines."

Sua mais recente publicação é "Electrical Insulation for Rotating Machines-Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair", que foi escrita com o apoio dos parceiros Ian Culbert, Al Boulter and Hussein Dhirani.

Dr.Stone é integrante e colaborador da IEEE e IEC, trabalhando em grupos que realizam o desenvolvimento de normas e padrões para motores e geradores