



II ENAM

ENCONTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

 **Eletronorte**
Centrais Elétricas do Norte do Brasil SA



II ENAM – Belém, PA, Brasil, 07 a 10 de novembro de 2004

CATÁLOGO DE DEFEITOS E METODOLOGIA PARA INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE DESCARGAS PARCIAIS EM HIDROGERADORES

RIBEIRO, Antonio Boulanger Uchoa

boulange@furnas.com.br

FURNAS-CENTRAIS ELÉTRICAS S/A

Rio de Janeiro – RJ

RESUMO

As descargas parciais ocorrem em ocorrem nos enrolamentos estatóricos de hidrogeradores resfriados a ar com tensão fase-terra acima de 5 kV. Como elas são um dos principais fatores que aceleram o envelhecimento do isolamento, a sua medição e o acompanhamento da tendência de sua evolução indicam o estado do enrolamento. Assim, nas últimas décadas, considerável esforço tem sido dedicado ao desenvolvimento de meios para identificar, medir, avaliar e diagnosticar este fenômeno.

Os primeiros métodos empregados para medir o nível de descargas parciais exigiam o desligamento da unidade geradora, a desmontagem de partes da máquina para que se tivesse acesso ao enrolamento estatórico, e a energização deste enrolamento com uma fonte externa. Tais ensaios, além de não simularem uma situação real de operação do gerador, eram de difícil interpretação, ou ainda demandavam grande indisponibilidade da máquina.

Nos anos 70, foi desenvolvido um sistema de medição de descargas parciais *on-line*, ou seja, que não exigia a parada ou desmontagens da unidade geradora. Este trabalho apresenta um catálogo de defeitos identificados pelos usuários deste sistema e uma metodologia para a análise dos resultados, e visa subsidiar a interpretação e a realização de diagnósticos.

PALAVRAS-CHAVE

Monitoração, descargas parciais, hidrogeradores

1.0 A MEDIÇÃO *ON-LINE* DE DESCARGAS PARCIAIS

Em 1976, sob patrocínio da *CEA-Canadian Electrical Association*, foram iniciados os estudos para o desenvolvimento de um sistema de detecção de descargas parciais para aplicação *on-line* em enrolamentos estatóricos de grandes máquinas rotativas visando realizar as medições sem desmontagens e com a máquina em operação. O resultado deste projeto é o *PDA-Partial Discharge Analyzer*.

O PDA é um sofisticado instrumento eletrônico que mede o número (quantidade de pulsos por segundo) e a amplitude dos pulsos de descargas parciais (em milivolts), oferecendo como saída a plotagem de duas curvas, uma para os pulsos positivos e outra para os pulsos negativos. O instrumento é portátil, e pode ser usado em todos os geradores de uma usina ou de várias usinas. Os resultados dos ensaios podem ser visualizados em tela de microcomputador, armazenados e/ou impressos.

O ensaio com o PDA é, em essência, uma medição *on-line* de descargas parciais utilizando acopladores capacitivos permanentes no enrolamento estatórico. Esses acopladores consistem



II ENAM

ENCONTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Eletronorte
Centrais Elétricas do Norte do Brasil SA



II ENAM – Belém, PA, Brasil, 07 a 10 de novembro de 2004

em capacitores de 80 pF, a base de, no mínimo, dois por fase, cada um deles conectado na entrada de um dos circuitos paralelos do enrolamento através de um dos seus terminais, sendo o outro ligado, via cabo coaxial, à caixa terminal, normalmente instalada fora do gerador. Para realizar o ensaio basta conectar o PDA aos conectores na caixa terminal.

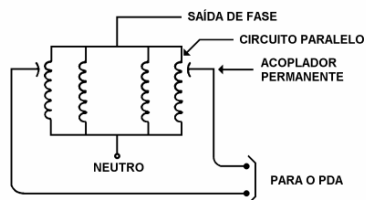


Figura 1: Circuito para medição *on-line* de descargas parciais.

O ensaio com o PDA é realizado normalmente duas vezes ao ano, com a máquina operando em quatro condições:

- Plena Carga a Quente (também chamado de *Full Load Hot* ou FLH): realizado com a máquina em carga nominal e temperatura estabilizada.
- Em Vazio a Quente (também chamado de *No Load Hot* ou NLH): imediatamente após o FLH, retira-se a carga da máquina e realizam-se as medições.
- Em Vazio a Frio (também chamado de *No Load Cold* ou NLC): deixa-se a máquina em vazio até que a temperatura estabilize, e realizam-se as medições.
- Em Carga a Frio (também chamado de *Full Load Cold* ou FLC): imediatamente após o NLC, coloca-se carga na máquina e realizam-se as medições.

Os quatro ensaios têm o objetivo de medir a atividade de DP (descargas parciais) e, através de comparações entre eles, identificar o tipo de efeito predominante.

Na impossibilidade de se realizar os quatro ensaios, deve-se realizar apenas o ensaio a plena carga a quente, ou seja, o *Full Load Hot*, que melhor representa as condições de operação da máquina. Em se detectando alterações em relação aos ensaios anteriores, deve-se então realizar a bateria completa para melhor identificar e/ou caracterizar o problema.

As descargas parciais são influenciadas pela temperatura do enrolamento e pela carga do gerador, da seguinte forma:

1.1 EFEITO DA CARGA DO GERADOR

Carga significa corrente elétrica no enrolamento e corrente significa força atuando nas barras/bobinas, força esta que é proporcional ao quadrado da corrente, além de ser pulsante com o dobro da frequência nominal. Assim, variando-se a carga do gerador é possível determinar se o enrolamento está preso ou frouxo nas ranhuras, pois:

- Em enrolamentos frouxos a atividade de descargas parciais varia com a corrente, ou melhor, com o esforço mecânico;
- Esse efeito é mais predominante em enrolamentos classe F do que B, pois enquanto que os isolamentos Classe F, termorrígidos, vibram nas ranhuras, os classe B, termoplásticos, amoldam-se nas ranhuras, sofrendo pouco efeito vibratório.



II ENAM

ENCONTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO DE MÁQUINAS ROTATIVAS



II ENAM – Belém, PA, Brasil, 07 a 10 de novembro de 2004

1.2 EFEITO DA TEMPERATURA DO ENROLAMENTO

As descargas parciais internas ao isolamento, ou seja, aquelas que ocorrem nos vazios e delaminações no interior da parede isolante, dependem da temperatura, devendo-se notar que:

- em alguns casos, à medida que a temperatura sobe, o material isolante se expande, fechando vazios e delaminações, e diminuindo, conseqüentemente, a atividade de descargas parciais;
- o efeito da temperatura é mais pronunciado em isolamentos asfálticos e com resinas poliéster.

1.3 EFEITO DA POLARIDADE

O efeito da polaridade é visualizado comparando-se a posição relativa das curvas para os pulsos positivos e negativos, podendo-se assim identificar o tipo predominante de descargas parciais que está ocorrendo. A tabela 1 ilustra diversos casos.

A interpretação dos resultados do ensaio com o PDA é bem mais fácil que a dos outros ensaios convencionais, pois eles são menos subjetivos. Como os resultados são livres de interferências e como os ensaios podem ser feitos freqüentemente, é relativamente fácil adquirir-se dados para determinar se a atividade de DP está estável ou diminuindo. O aumento da atividade de DP indica a deterioração do isolamento.

O sistema de medições *on-line* oferece a oportunidade de se monitorar com freqüência a condição do enrolamento estático sem a necessidade de desmontagens. Além disso, a variação dos níveis de DP com a carga indica, freqüentemente, afrouxamento do enrolamento nas ranhuras.

RELAÇÃO	MECANISMO OU PROBLEMA	OBSERVAÇÕES:
+DP>-DP	Enrolamento Frouxo Descargas nas Ranhuras	+DP aumenta com a carga (MW e MVar); pequeno efeito da temperatura para isolamentos <i>epoxi-mica</i> ; falhas podem acontecer em poucos anos.
+DP=-DP	Deterioração por temperatura	Pequeno efeito da carga; em isolamentos com flocos de mica a falha pode levar muitos anos.
+DP<-DP	Deterioração por ciclos térmicos	A falha pode ocorrer rapidamente em isolamentos com papel de mica.
+DP>-DP	Deterioração da camada semicondutora.	A atividade de descargas parciais não varia com a carga se o enrolamento estiver bem preso; nesse caso o mecanismo da falha é lento; pode ocorrer falha por ozônio.

Tabela 1: Relação entre a polaridade das descargas parciais e os mecanismos de deterioração do isolamento

O fato do ensaio com o PDA permitir a realização de leituras rápidas em diferentes cargas permite diagnosticar a existência de descargas nas ranhuras muito facilmente. A experiência mostra que um aumento ou diminuição significativa (da ordem de 25% na amplitude dos pulsos em ensaios a plena carga e em vazio) indica a ocorrência de descargas parciais nas ranhuras, que são o meio predominante de deterioração de isolamentos mica-epoxi em hidrogeradores.

2.0 CURVAS-PADRÃO

As figuras 2 a 18 a seguir apresentam uma série de curvas de comportamento correspondentes aos diversos mecanismos de deterioração detectados pelo ensaio com o PDA e que são



II ENAM – Belém, PA, Brasil, 07 a 10 de novembro de 2004

considerados como “padrões” na análise de resultados. Nelas, são indicados o número de pulsos por segundo observados dentro de uma faixa de amplitudes (janela) centrada num dado valor de amplitude e polaridade de pulsos.

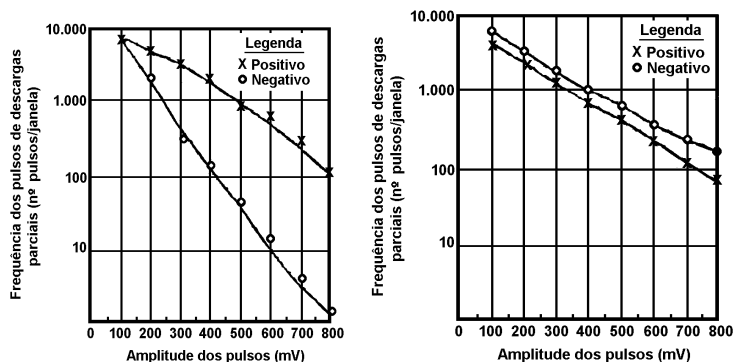


Figura 2: Atividade de descargas parciais em geradores. À esquerda, o predomínio dos pulsos positivos sobre os negativos indica problemas na camada semicondutora e/ou descargas nas ranhuras. À direita, padrão para descargas entre o condutor e a parede isolante.

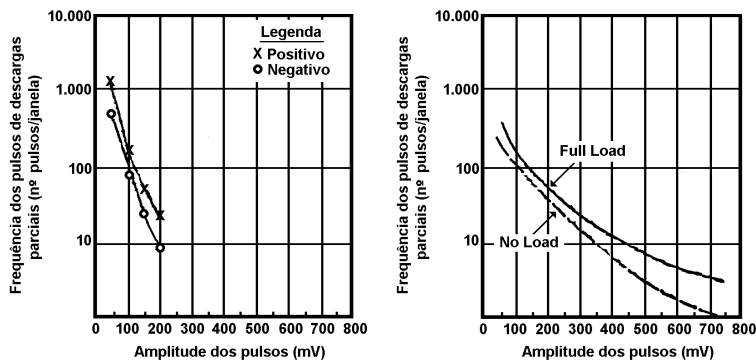


Figura 3: À esquerda, padrão para descargas no interior da parede isolante. À direita, comparação entre as curvas dos pulsos positivos para os ensaios FLH e NLH; a diferença entre elas indica o afrouxamento do enrolamento nas ranhuras.

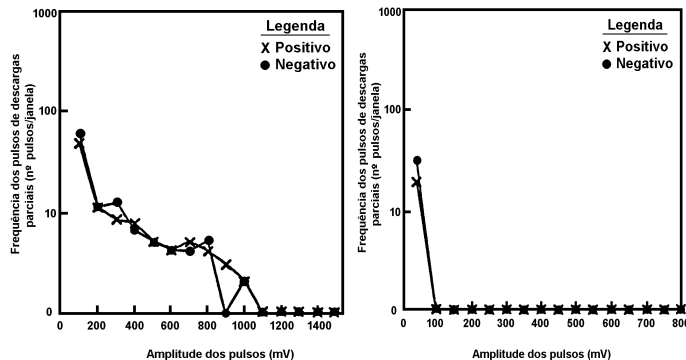


Figura 4: À esquerda, padrão de atividade de descargas parciais ocorrendo nos cantos da seção da barra/bobina. À direita, nível de descargas num gerador de 19 anos, bem projetado, fabricado e instalado.



II ENAM – Belém, PA, Brasil, 07 a 10 de novembro de 2004

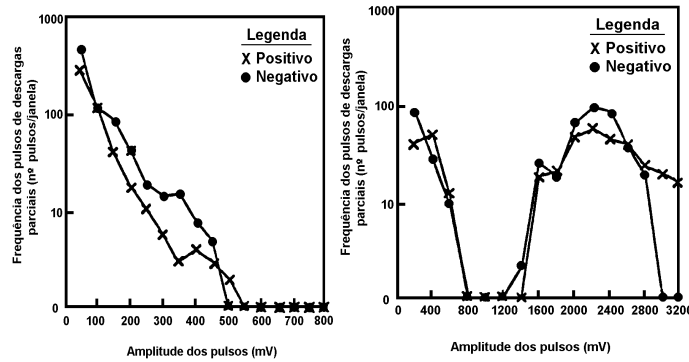


Figura 5: À esquerda, padrão de atividade normal para um gerador de 15 anos com isolamento termorrígido. À direita, padrão para descargas externas, caracterizado por um pulso de nível entre 10 e 200 pps, nos níveis entre 1600 e 3200 mV.

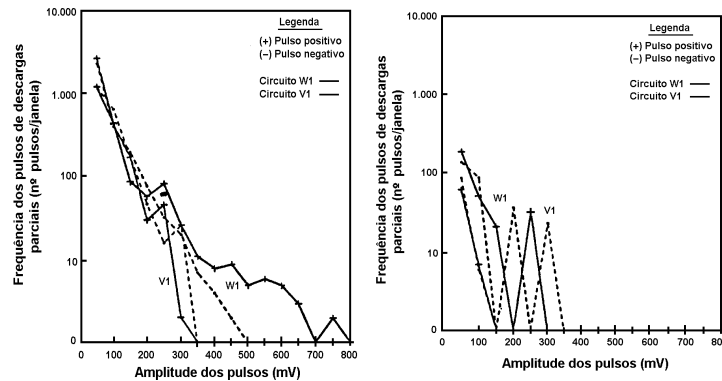


Figura 6: À esquerda, padrão de atividade de descargas parciais para descargas nas ranhuras; esse tipo de atividade é caracterizado por picos de forma triangular nas curvas. À direita, padrão de atividade de descargas parciais para descargas nas ranhuras. Esse tipo de atividade é caracterizado por picos de forma triangular nas curvas.

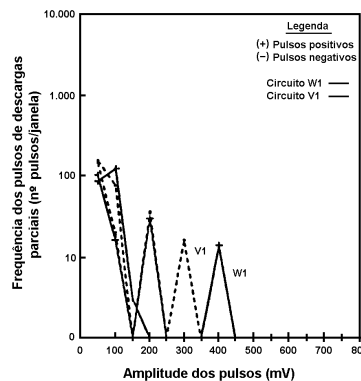


Figura 7: Padrão de atividade de descargas parciais para descargas nas ranhuras. Esse tipo de atividade é caracterizado por picos de forma triangular nas curvas.



II ENAM – Belém, PA, Brasil, 07 a 10 de novembro de 2004

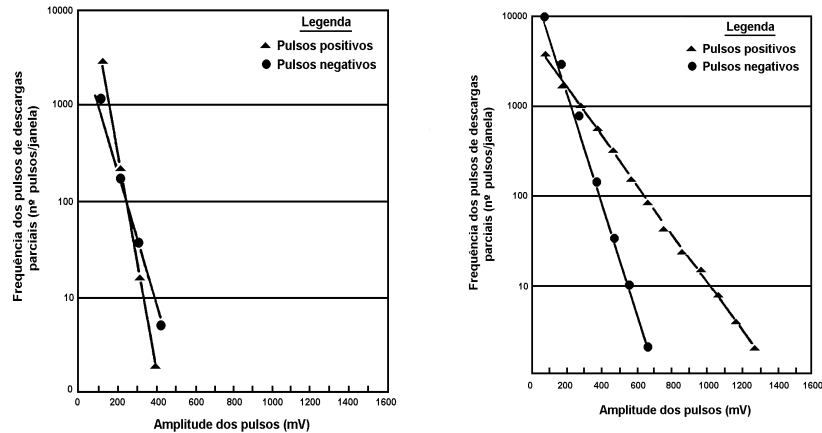


Figura 8: Padrão de atividade de descargas parciais em um gerador que possui um enrolamento estático a base de mica-poliéster, de 28 anos de idade, em boas condições, ensaiado a 75 MW/70°C (FLH). À direita, padrão de atividade de descargas parciais em um gerador similar ao da figura anterior, mas que possui um enrolamento de 10 anos de idade, a base de *mica-epoxi*, em más condições.

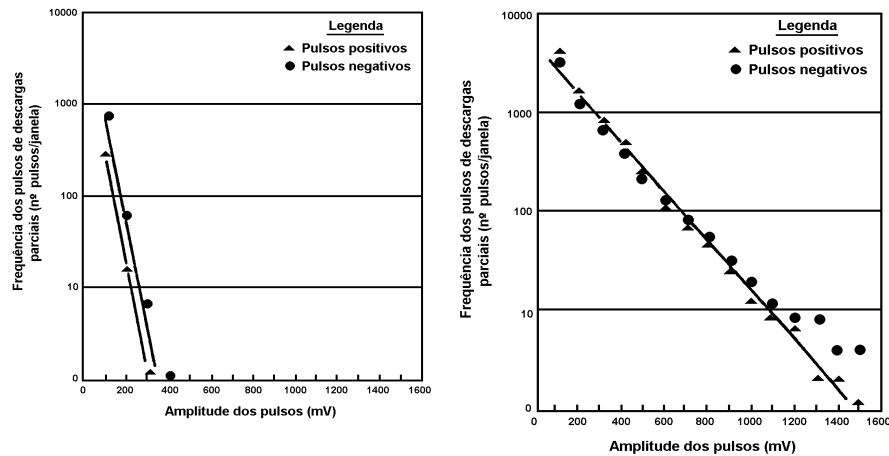
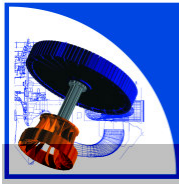


Figura 9: À esquerda, padrão de atividade de descargas parciais em enrolamento a base de *mica-epoxi*, de um gerador de 255 MW ensaiado a 255 MW/45°C (FLC), instalado em 1970. À direita, padrão de atividade de descargas parciais em enrolamento a base de *mica-epoxi*, de um gerador de 255 MW, idêntico ao da figura anterior, mas instalado em 1977, ensaiado a 255 MW/75°C (FLH).



II ENAM – Belém, PA, Brasil, 07 a 10 de novembro de 2004

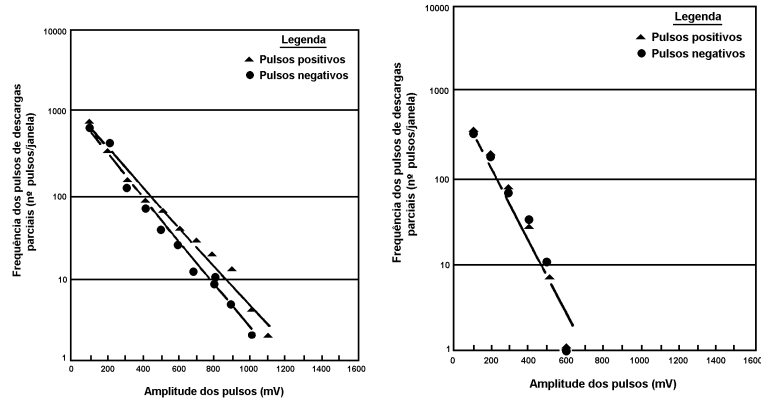


Figura 10: Ensaios em laboratório em uma barra retirada de um enrolamento com vários anos de operação, isolamento em mica-poliéster. A barra apresentou problemas de descargas internas (a pintura semicondutora e gradiente estavam em perfeitas condições). Como se pode notar, a atividade diminuiu com a temperatura.

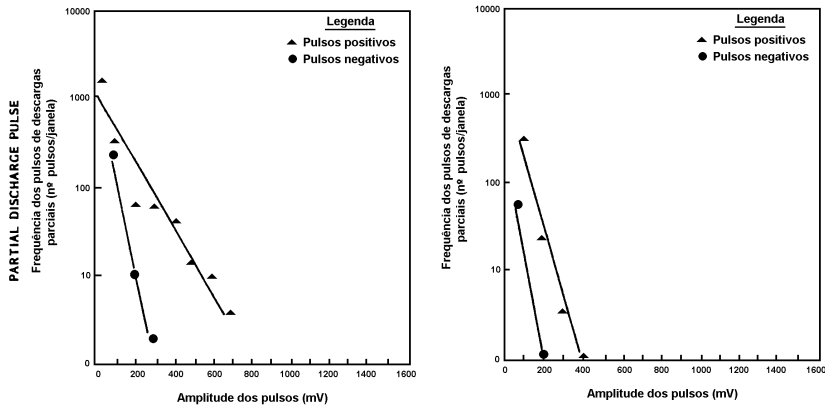


Figura 11: Comparação entre os níveis de atividades de descargas parciais no enrolamento de um gerador de 58 MW, a 60°C (FLH), antes e após reparos e recunhagem.

3.0 ANÁLISE EXPEDITA DOS RESULTADOS

Embora diversas informações sejam coletadas durante um ensaio com o PDA, e sua análise seja um tanto quanto complexa, dois parâmetros podem ser utilizados para uma análise rápida e eficiente: São o Pico de Atividade de Descargas Parciais (Qm) e a Atividade Total de Descargas Parciais (NQN). A Qm fornece a amplitude de pulsos para uma dada taxa destes mesmos pulsos, por exemplo, para 10 pps. Já o NQN é um número que representa a área da curva obtida (taxa de pulsos vs amplitude de pulsos).



II ENAM

ENCONTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO DE MÁQUINAS ROTATIVAS



II ENAM – Belém, PA, Brasil, 07 a 10 de novembro de 2004

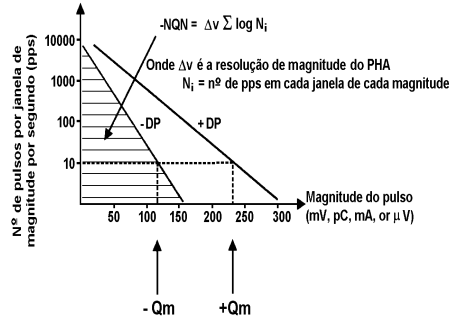


Figura 12: Os parâmetros Qm e NQN para análise de tendências.

As tabelas 2 e 3 apresentam diagnósticos expeditos em função destes índices. Uma interpretação mais ampla destes resultados leva a concluir que:

- a) Quanto maior o índice NQN, maior/mais generalizada é a deterioração do isolamento;
- b) Quanto maior o índice Q_m , maior é a probabilidade de falha iminente.

FATOR	FAIXA	DIAGNÓSTICO
Q_m	<150 mV	Bom estado
Q_m	>500 mV	Ruim
NQN	<100	Bom

Tabela 2: Números de referência para análise grosseira dos ensaios com o PDA (Fonte: IRIS-Power Engineering)

NQN	DIAGNÓSTICO PARA SISTEMAS COM EPOXI OU POLIÉSTER
0 a 100	Enrolamento preso nas ranhuras e com isolamento em boas condições. Normalmente, os valores de +NQN e -NQN são praticamente iguais.
101 a 250	Início de deterioração da camada semicondutora nas barras/bobinas de alta tensão dos circuitos paralelos (10%). Diferenças entre pulsos positivos e negativos. +NQN provavelmente 15 a 20% maior que -NQN.
251 a 400	A deterioração na camada semicondutora estará presente em 20 a 25% dos circuitos. O dano será visível. Descargas internas poderão estar ocorrendo em isolamentos com 25/30 anos. +NQN provavelmente 30 a 40% maior que -NQN.
>451	A deterioração da pintura semicondutora atinge maior área do enrolamento. Em estatores com núcleos altos (>238,6 cm) delaminações entre cobre e o isolamento provavelmente presentes em isolamentos com idade superior a 8/10 anos.

Tabela 3: Diagnósticos em função do NQN.

A experiência que adquirimos com os geradores da nossa amostragem e o resultado dos ensaios obtidos, somada a evolução da tecnologia com o uso do PDA, nos leva a julgar que a análise resumida na tabela acima é muito severa. Além disso, ressaltamos, o NQN é um número de referência, devendo ser dada mais atenção à sua evolução ao longo dos anos que propriamente ao seu valor absoluto.

4.0 MÉTODO DESENVOLVIDO PARA ANÁLISE DO ENSAIO COM O PDA

Os resultados que obtivemos até aqui levaram à elaboração de um critério para análise aproximada e para a tomada de decisões de manutenção. Nele, a avaliação da atividade de DP é



II ENAM – Belém, PA, Brasil, 07 a 10 de novembro de 2004

feita a partir da área “S” ocupada pelas medidas de amplitude (mV) vs número de pulsos (pps), conforme a figura 13, e de acordo com os seguintes critérios:

ÁREA “S” [mV x pps]	DIAGNÓSTICO DA ATIVIDADE DE DP	PROVIDÊNCIAS
$S < 100 \times 100$	Muito baixa	Monitorar a cada 6 meses
$100 \times 100 < S < 200 \times 200$	Baixa	Monitorar a cada 6 meses
$200 \times 200 < S < 500 \times 500$	Média	Monitorar a cada 3 meses
$S > 500 \times 500$	Alta	Monitorar a cada 3 meses

Tabela 4: Valores sugeridos para análise aproximada dos resultados do ensaio com o PDA.

Quanto à evolução das grandezas NQN e Qm ao longo do tempo, ou seja, às tendências, podemos adotar os seguintes critérios:

COMPORTAMENTO AO LONGO DO TEMPO	DIAGNÓSTICO
Constante	Isolamento em boas condições
Cresce rapidamente ao longo dos anos e então estabiliza ou decresce	Próximo de ocorrer falha
Dobrando a cada seis meses	Planejar ação corretiva pois está ocorrendo deterioração acelerada do isolamento

Tabela 5: Análise da tendência do NQN e da Qm.

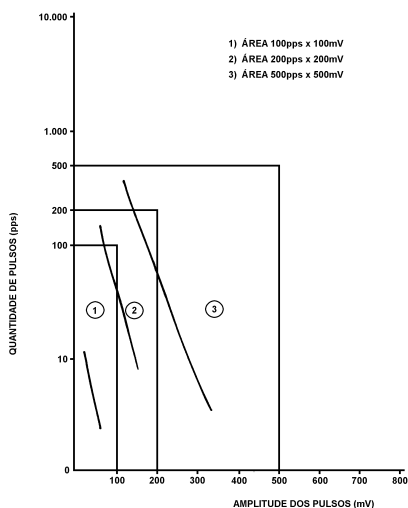


Figura 13: Área “S” para a análise da atividade de descargas parciais.

Visando estabelecer uma metodologia para a análise dos resultados dos ensaios com o PDA, sugerimos o seguinte procedimento:

- Registrar, no formulários apresentado no Anexo 1, os dados da Usina, Máquina, data do ensaio, fase, acoplador e o ganho do instrumento; preencher a tabela com a tensão de referência (volts), temperatura (°C), tensão terminal (kV), potência ativa (MW), potência reativa (MVar), NQN+, NQN-, Qm+, Qm-, para cada ensaio (FLH, NLH, NLC, FLC).
- Verificar o nível de atividade no ensaio NLC: deve ser baixa.
- Comparar, superpondo os gráficos, os ensaios NLC e FLC: devem ser similares se não houver afrouxamento.



II ENAM

ENCONTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO DE MÁQUINAS ROTATIVAS



II ENAM – Belém, PA, Brasil, 07 a 10 de novembro de 2004

- d) Comparar, superpondo os gráficos, os ensaios FLH e NLH: verifica-se nessa condição o efeito da carga. Caso as curvas para os pulsos positivos coincidam, o enrolamento é considerado preso nas ranhuras. Este efeito e mais a análise da polaridade predominante determinarão o mecanismo de deterioração existente.
- e) Comparar, superpondo os gráficos, os ensaios FLH e FLC: verifica-se aqui o efeito da temperatura. Diferenças significam descargas internas. O tipo da atividade será determinado pela polaridade predominante.
- f) Verificar o efeito da polaridade.
- g) Verificar o nível global de atividade de DP, de acordo com a tabela 4 (área S).
- h) Verificar as tendências da Q_m e do NQN ao longo do tempo.
- i) Análise da Q_m de acordo com a tabela 2.

5.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] - KURTZ, M. et al – Application of the Partial Discharge Analyzer Testing to Hydrogenerator Maintenance, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 8, August, 1984.
- [2] - LYLES, J.F., STONE, G.C., KURTZ, M. – Experience with PDA Diagnostic Testing on Hydraulic Generators, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, No. 4, Dec. 1988.
- [3] - LYLES, J.F. – Achieving 50 Years Stator Winding Life, CEA Conference on Partial Discharge Testing, Toronto, April 1994.
- [4] - ROBLES, E., MEDINA, A. – Assessment of El Caracol Unit 1 Generator with On-line and Off-line Partial Discharge Measurements, FES International Workshop, Atlanta, November 1993.
- [5] - Stone, G.C. – Techniques for On-line Partial Discharge Testing of Motors and Generators, CEA Conference on Partial Discharge Testing, Toronto, April 1994.
- [6] – Ribeiro, A.B.U. – Avaliação do Estado de Enrolamentos Estatóricos através de Ensaio de Manutenção, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.



II ENAM

ENCONTRO NACIONAL DE
MONITORAMENTO DE
MÁQUINAS ROTATIVAS



II ENAM – Belém, PA, Brasil, 07 a 10 de novembro de 2004

ANEXO 1

ANÁLISE DE ENSAIOS DE DESCARGAS PARCIAIS EM HIDROGERADORES

USINA:	MÁQUINA:	DATA:
FASE:	ACOPLADOR:	GANHO:

ENSAIO	Vref	TEMP	kV	MW	MVAr	NQN(+)	NQN(-)	Qm(+)	Qm(-)
FLH									
NLH									
NLC									
FLC									

Nível de atividade no NLC:	
Comparar NLC x FLC:	
Comparar FLH x NLH:	
Comparar Qm(FLH) com Qm(NLH):	
Comparar FLH x FLC:	
Efeito da polaridade:	
NQN > 1000?	
Há DP acima da área 200 x 200?	
Há DP acima da área 500 x 500?	

CONCLUSÕES:

ANALISADO EM:	POR:	VISTO:
----------------------	-------------	---------------