



**GRUPO I**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA (GGH)**

**MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM HIDROGERADOR DA USINA DE ITAIPU – UMA  
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS LIMITAÇÕES, DIFICULDADES DE MEDIÇÃO E  
INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS**

Marcelo Fabiano Latini\*    Juan Carlos Henning    José Simão Filho

(ITAIPU)

Alan Françoi S.Levy

(CEPEL)

**RESUMO**

Neste trabalho apresentam-se os resultados dos testes realizados com medições de descargas parciais em um gerador da Usina Hidrelétrica de Itaipu.

Foram simulados defeitos na isolação, possíveis de serem encontrados neste tipo de equipamento. Uma parte das medições foi realizada em um circuito independente do gerador, para fins de ajuste dos circuitos de ensaio e medição, instrumentação e verificação do efeito das capacitâncias nas medições. Outra parte foi realizada com simulação de defeitos ao longo da fase C do enrolamento estático do gerador da U10. Os resultados obtidos demonstram que a medição de descargas parciais para grandes geradores necessita ainda de uma melhor concepção teórica para fornecer dados úteis à manutenção.

**PALAVRAS-CHAVE**

Descargas parciais, Isolação, Gerador

**1.0 INTRODUÇÃO**

A medição de descargas parciais (DP) on-line pela metodologia elétrica é atualmente a única técnica adotada para se ter informações sobre as condições de isolamento das barras estáticas dos hidrogeradores, em operação.

Deste modo todos os esforços devem ser empregados para que esta medição alcance resultados consistentes.

Devido a importância do controle das DP no gerador, somado às dificuldades hoje encontradas para a realização de sua medição, foi decidido, antes da aquisição de um sistema, elaborar uma sequência de atividades experimentais que fossem suficientes para trazer maior conhecimento sobre:

- as características dos circuitos de ensaio e medição, e da instrumentação a ser utilizada;
- comportamento específico das máquinas de ITAIPU quanto à medição de DP;
- as avaliações a serem estabelecidas à partir dos resultados encontrados nas medições.

A medição de DP em geradores é certamente mais complexa que para outros equipamentos, possuindo capacitância total muito elevada, e comportamento global similar a um trecho de linha de transmissão, acarretando em dificuldades para se prover um sistema de medição com desempenho satisfatório.

Os instrumentos utilizados para medição de DP são digitalizados e registram um mapa de ocorrência das DP (N) em função de sua localização sobre os ciclos da senóide de tensão aplicada ( $\phi$ ) e sua intensidade (q) (mapa  $\phi$ -q-N).

Foram preparadas três amostras de barras de aproximadamente 1 metro de comprimento cada uma, com defeitos conhecidos e previamente provocados, afim de simular:

- barra 1 – descargas de ranhura

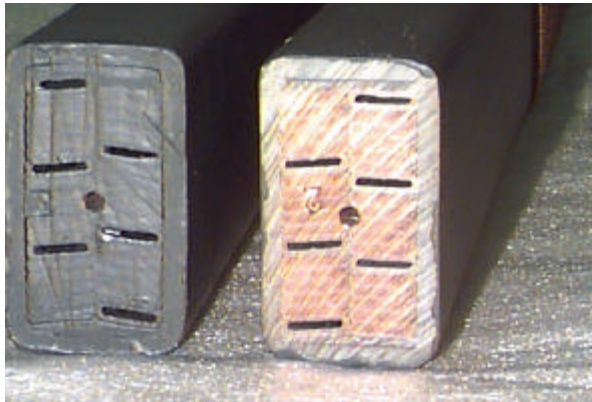
\*ITAIPU BINACIONAL

Av. Presidente Tancredo Neves, 6731 – Foz do Iguaçu – PR – cep 85.856-970

Tel.: (045) 520-2367 – FAX (045) 522-7471

latini@itaipu.gov.br

- barra 2 – corona na cabeça de bobina
- barra 3 – delaminação ver Figura 1



**FIGURA 1 – Deslocamento da isolamento – barra 3**

Durante as atividades, diversas combinações sobre o posicionamento dos capacitores de acoplamento, tipos de barras com defeito, níveis de tensão aplicada, faixas de frequência de medição, posicionamento das barras defeituosas, etc. foram implementadas. Com o conjunto de resultados obtidos foi possível fazer uma avaliação mais detalhada sobre o que é possível de se esperar desse tipo de medição.

## 2.0 SIMULAÇÃO DE DEFEITO

As atividades experimentais foram desenvolvidas em duas etapas bem distintas:

### 2.1- Etapa 1

Medição de DP em barras estatóricas com defeito, em circuito de ensaio totalmente independente do gerador.

Estas medições tiveram por objetivo avaliar a instrumentação utilizada junto com as unidades de acoplamento; obter informações sobre as características dos softwares utilizado e identificar as características de ( amplitude e distribuição ) das DP que estavam sendo geradas, além de sua apresentação nos instrumentos de medição.

### 2.2- Etapa 2

Medições de DP com os circuitos de ensaio e medição montados na sua posição real, considerando suas conexões com a fase e neutro do gerador.

O objetivo básico das medições foi de verificar o desempenho dos sistemas de medição de descargas parciais considerando-se: as instalações dos circuitos de ensaio e medição no neutro e na fase do gerador; as influências dos ruídos eletromagnéticos típicos que normalmente ocorrem nesse tipo de medição e o efeito do próprio enrolamento estatórico na medição de DP.

## 3.0 DISPOSITIVOS PARA SIMULAÇÃO DE

## DEFEITOS NO GERADOR

Foram utilizados vários dispositivos para geração de DP em paralelo com o enrolamento do gerador, conforme segue:

- Um centelhador ponta-plano ao ar ambiente;
- Uma amostra de barra usada de um gerador de ITAIPU;
- E as três barras simulando os defeitos conforme citado no item 1.

As barras foram as mais utilizadas durante as experiências junto com o gerador. Os níveis das DP inicialmente medidos nessas barras estão apresentados na tabela abaixo.

**TABELA 1 - Níveis de DP em pC medidos nas amostras, com tensão de 10,4kV**

Barra 1	Barra 2	Barra 3
20.000	11.000	20.000

O centelhador ponta-plano e a amostra de barra usada, foram apenas utilizados nas medições iniciais previstas na etapa 1.

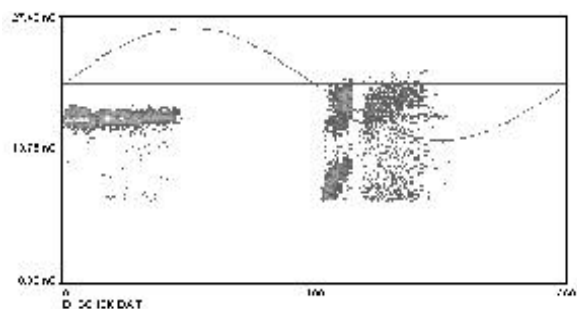
## 4.0 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Como foi dito anteriormente as medições foram realizadas em duas etapas, e os resultados estão apresentados a seguir.

### 4.1- Medições realizadas na etapa 1

Inicialmente o sistema de medição foi calibrado com um sinal de 10.000 pC e forneceu o mapa de ocorrência de descargas parciais, conforme Figura 2.

O principal ponto, no entanto, a ser considerado nessa primeira seqüência de medições, se refere aos levantamentos dos mapas de descargas parciais fornecidos pelos defeitos simulados, e a constatação da atenuação dos sinais gerados pelas descargas parciais, quando se introduziu no circuito um capacitor de 2,4  $\mu$ F equivalente a capacitância do gerador.



**FIGURA 2 - Mapa de DP da barra 1 (20.000 pC)**

Essas medições confirmaram a expectativa de uma atenuação significativa dos sinais medidos em relação

aos sinais gerados. Após as devidas calibrações, foram medidas amplitudes cerca de 30 a 80 % inferiores àquelas medidas sem o capacitor de 2,4  $\mu\text{F}$  no circuito. Ou seja, sinais de DP com cerca de 20.000 pC foram registrados "como se tivessem" níveis de 4.000 à 10.000 pC. Algumas conclusões podem ser obtidas a partir dessas medições:

- O capacitor de acoplamento deve ter, em princípio, uma capacitância tão mais elevada quanto possível.
- A relação entre a capacitância do capacitor de acoplamento e a capacitância do equipamento sob ensaio (isolamento estatórico) afeta substancialmente os níveis de DP efetivamente registrados.

## 4.2- Medições realizadas na etapa 2

### 4.2.1- Configuração dos sistemas de medição

A configuração do sistema de medição utilizado é composta de 4 acopladores, sendo um instalado no cubículo de surto de cada fase e outro no cubículo de aterramento do neutro do gerador.

O capacitor de acoplamento é formado por uma unidade de alta tensão com capacitância de 150 nF (capacitor de surto) aterrada através de uma impedância de 50  $\Omega$ . Foi utilizado também um capacitor de 9 nF cuja conexão para a terra é envolvida por um TC para altas frequências.

### 4.2.2- Seqüência dos ensaios

Inicialmente foi realizada a calibração, do circuito de medição, injetando-se 10.000 pC no enrolamento. A fase C, em seguida, sem nenhum defeito simulado, foi submetida a uma tensão aplicada de 12 kV por cinco minutos e logo após reduzida para 10,4 kV, quando foi observado que o nível de ruído medido ficou em torno de 2.000 pC.

Na seqüência dos testes foram realizadas as seguintes simulações:

- Barra 1 instalada na cabeça de bobina 484, correspondente a 90 % da tensão nominal;
- Barra 2 instalada na cabeça de bobina 484, correspondente a 90 % da tensão nominal;
- Fase C desconectada, sendo o teste realizado somente no "bus duct" de neutro;
- Fase C sem o neutro, "bus duct" desconectado;
- Fase C com neutro desconectado, com a barra 1 conectada a 100 % com medição no cubículo de surto;
- Fase C com neutro desconectado, com a barra 2

conectada a 100 % com medição no cubículo de surto;

- Fase C com neutro desconectado, com a barra 1 conectada a 0, 10 e 30 % com medição no link de neutro pelo lado do enrolamento;
- Fase C com neutro desconectado, com a barra 2 conectada a 0, 10 e 30 % com medição no link de neutro pelo lado do enrolamento;
- Monitoramento das DP com a unidade U10 em operação normal.

Nota: O enrolamento dos geradores de Itaipu permite acesso ao cobre de todas as barras apenas removendo a capa da cabeça de bobina

### 4.2.3- Resultados dos ensaios

Cada fase do enrolamento estatórico pode ser, de modo simplificado, representada para altas frequências, por parâmetros distribuídos como se fosse um trecho de linha de transmissão com impedâncias indutivas série, impedâncias capacitivas para terra e impedâncias mútuas. A simulação das três fases de um gerador, para alta frequência se torna então muito difícil.

Por essas complexidades que envolvem o sistema dielétrico que está sendo ensaiado é que se torna importante realizar medições nas condições mais próximas daquelas reais e fazer um levantamento mais detalhado em termos experimentais.

Conforme os parâmetros elétricos do enrolamento, os sinais de alta frequência sofrem grandes atenuações desde seu ponto de origem até os acopladores de medição. Além disso, em função do local de ocorrência, as características de um mesmo defeito podem apresentar, no ponto medido, espectros de frequência de forma variada.

Quanto a calibração, como a carga aparente medida é função da faixa de frequência considerada, os sinais calibrados em um único ponto do enrolamento estatórico podem não ser suficientes. Isso quer dizer que pode não haver linearidade quando da calibração ao longo do enrolamento das fases em função das faixas de frequência consideradas. Da mesma forma, as atenuações do sinal de calibração injetado em diversos pontos do enrolamento são diferentes das descargas reais que estão sendo geradas, visto que as diferentes características de frequência das descargas se traduzem em cargas diferentes nos vários acopladores em função de seu ponto de ocorrência ao longo das barras das fases.

No caso das medições ao longo do enrolamento da fase C, foram utilizados basicamente três capacitores de

acoplamento sendo um capacitor de 160 nF ligado ao neutro do enrolamento; um capacitor de 150 nF ligado à fase C e um capacitor de 9 nF que foi deslocado para alguns pontos ao longo do enrolamento, conforme Figura 3.

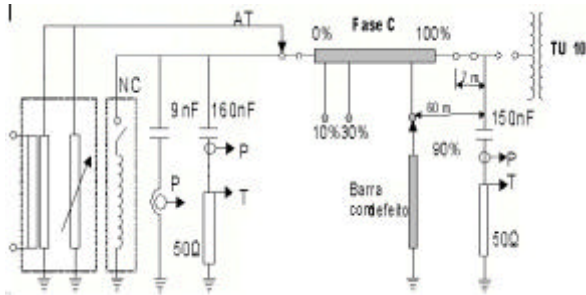


FIGURA 3 - Configuração das medições na fase C

Onde:

AT → alta tensão;

NC → cubículo de neutro;

P → acoplador de 9 nF;

T → acoplador do 150 (fase) e 160 nF (neutro);

Os resultados experimentais obtidos da fase C da unidade 10, estão resumidamente apresentados na tabela 2.

TABELA 2 – Resultado das medições

Percent. Do enrolam	Barra 1 (20.000 pC)	Barra 2 (11.000 pC)	Barra 3 (20.000 pC)
0	11.000* 17.000*	5.000* 7.000*	15.000*
10	3.500*	≈500 (ruído) 1800*	3.500*
30	1.300*	-	-
90	≈1.500 (ruído) 2.000* (ruído)	(ruído)	-
100	12.000*	2.400 2.000* (ruído) 5.000*	-

\*circuito de ensaio com neutro desconectado

A barra 1 contendo descargas de ranhura foi colocada a 90 % do enrolamento (0 % corresponde ao ponto de neutro e 100 % corresponde à saída da fase C), tendo sido aplicada uma tensão de 10,4 kV, a qual fornece nessa barra, quando desconectada do gerador, descargas parciais em tomo de 20.000 pC..

Não foi detectado pelo sistema de medição nenhum sinal útil que caracterizasse as descargas ocorrendo na barra, quer seja pelos acoplamentos conectados ao neutro, quer seja pelo acoplamento conectado na saída da fase, conforme Figuras 4 e 5.

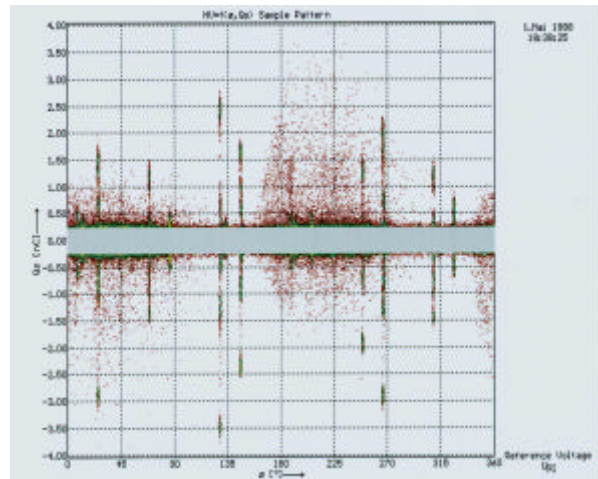


FIGURA 4 - DP da fase C sem defeito

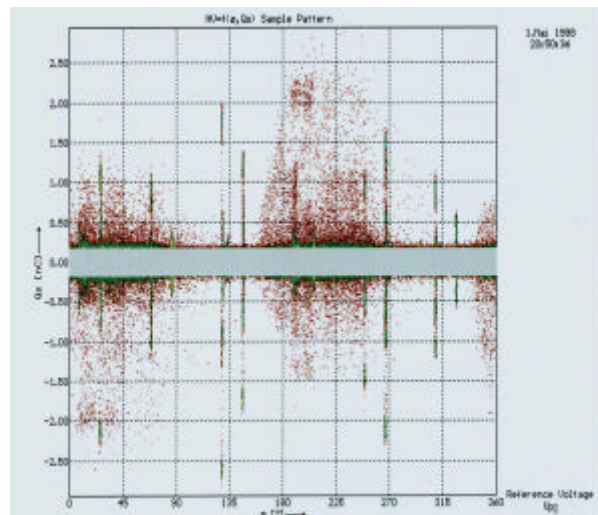


FIGURA 5 - DP da fase C com defeito (barra 1)

A mesma medição foi repetida com a barra 2 contendo DP externas do tipo corona e o resultado foi idêntico, como esperado, uma vez que esta barra gerava menos DP (≈ 11.000 pC).

Todas as medições efetuadas no enrolamento a partir desse momento, passaram a ser realizadas com o “bus duct” de neutro desconectado.

Essa condição não traduz a realidade dos circuitos de ensaio e medição em condições de operação do gerador, mas contribuiu para se ter um maior número de informações experimentais com os sistemas de medição.

Nessa nova condição, a barra de número 2 foi conectada a 100 % do enrolamento, ou seja, diretamente na saída da fase onde se encontrava um dos acoplamentos. Obteve-se assim um início de registro do mapa característico das DP, apresentando amplitudes da mesma ordem de grandeza dos mapas de ocorrência de DP obtidos sem a barra 2 conectada à



fase.

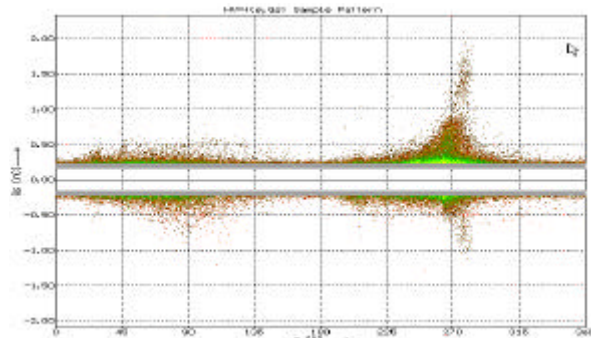
Independentemente da origem das DP registradas sem a barra no circuito, as quais podem ser provenientes de ruídos ou de descargas nas próprias barras do estator, o resultado dessa medição mostrou que um nível de DP da ordem de 11.000 pC não foi identificado, mesmo estando essa barra a 100 % do enrolamento e sem os agravantes trazidos pela operação contínua do gerador (operação dos tiristores).

Já a barra com descarga de ranhura (barra 1), que apresentava DP da ordem de 20.000 pC, teve seu respectivo mapa de ocorrência de DP registrado por todos os instrumentos, quando conectada à 100 % do enrolamento. Os níveis de descarga característicos, sem a barra defeituosa no circuito não mudaram. O capacitor de acoplamento de 9 nF instalado no lado do neutro não registrou nenhum sinal das descargas, como já esperado.

As condições de medição de DP devido a defeitos ao longo do enrolamento puderam ser verificadas ao se dispor a barra 1 a 90 % e 10% do enrolamento do gerador. No primeiro caso, os sinais de DP medidos com o acoplamento a 100 % do enrolamento apresentaram máximos em torno de 2.000 pC, ou seja, um pouco superior ao ruído ambiente esperado. As descargas medidas no neutro (0 %) com essa barra colocada à 10 % do enrolamento tiveram registros máximos da ordem de 3.500 pC. Ressalta-se que estes registros foram obtidos para uma descarga real em torno de 20.000 pC, com o terminal de neutro desconectado, sem os ruídos provenientes dos tiristores e outras fontes.

Com esse resultado verifica-se que não há simetria de comportamento entre as posições correspondentes a 10% e 90 % do enrolamento, em relação aos respectivos terminais. A medição no lado da fase, a qual é mais importante, demonstrou ser a mais crítica.

Ao substituir a barra 1 pela barra 2 os sinais das DP se localizaram um pouco acima do ruído ambiente, mesmo nessas condições "menos críticas" de medição, ou seja, a 10 % do enrolamento conforme Figura 6.



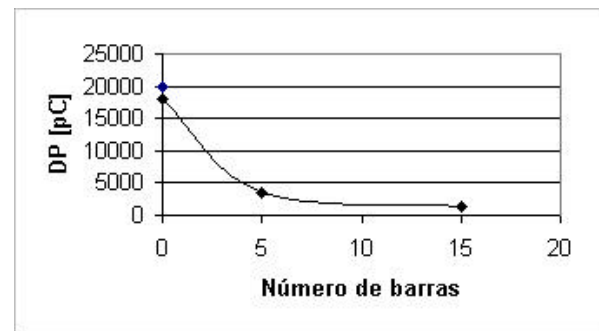
**FIGURA 6 - barra 2 a 10% do enrolam. 20000 pC**

A barra 3 praticamente apresentou o mesmo

desempenho, quando conectada a 10 % do enrolamento, ou seja, apresentou nível medido em torno de 3.500 pC.

Ao se colocar a barra 1 a 30 % do enrolamento, esta apresentou níveis máximos de DP da mesma ordem de grandeza que dos ruídos esperados, ou seja, em torno de 1.400 pC.

Em termos percentuais, com base apenas nos resultados obtidos, estima-se que uma barra com defeito não apresentará nenhum sinal mensurável de DP se medido a uma distância correspondente a 30 % ou mais do enrolamento; deverá apresentar cerca de 10 a 20 % do valor real se medida a uma distância correspondente a 10 % do enrolamento e, na melhor das hipóteses, até 50 % do sinal real se medido diretamente sobre a unidade de acoplamento, considerando as condições mais propícias de medição (não as mais reais) ao longo do enrolamento. Na prática, isso equivale a dizer que apenas as DP de grande amplitude que ocorrerem diretamente sobre o capacitor de acoplamento, serão registradas e efetivamente consideradas como reais sinais de DP do gerador, conforme Figura 7.



**FIGURA 7 - Atenuação das DP (barra 1)**

## 5.0 CONCLUSÕES

Pelos resultados apresentados acima, podemos tirar as seguintes conclusões:

- Descargas parciais ocorrendo ao longo do enrolamento estatórico, a menos que estas estejam ocorrendo praticamente sobre o capacitor de acoplamento e ao mesmo tempo que tenham elevadas amplitudes (> 10.000 pC), não serão registradas pelos sistemas de medição.
- A operação dos tiristores causa ruídos extremamente elevados, representando um outro obstáculo, não presente durante as medições realizadas.
- Não se espera que os sistemas detectem falhas tais como: descargas parciais provocadas por vazamento d'água, em qualquer nível de tensão que possa

ocorrer; corona na cabeça de bobina; bolhas na isolamento; trincas nas camadas semi-condutivas, etc. visto que estes defeitos geram sinais de DP da ordem de centenas de pC.

- Ficou evidenciado que, não é possível acompanhar a evolução da DP que porventura ocorram no gerador,
- ou seja os sistemas de medição atuais não podem ser utilizado como ferramenta de manutenção preditiva para grandes geradores.
- Uma provável melhoria dos sistemas seria a instalação de um maior número de acopladores no enrolamento, porém isto implicaria em um aumento de custo e dificuldades de processamento.

## 6.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) ALAN FRANÇOIS S. LEVY, Medições de descargas parciais, referente à implementação de sistemas de medição nas unidades hidrogeradoras da usina de Itaipu;
- (2) MARCELO FABIANO LATINI, JOSÉ SIMÃO E JUAN CARLOS HENNING, Memória da análise das medições de descargas parciais instalados na U10 de Itaipu;
- (3) MARCELO FABIANO LATINI, JOSÉ SIMÃO E JUAN CARLOS HENNING, Parecer técnico sobre análise de performance – resultados dos testes executados nos geradores das unidades U10 e U11 de Itaipu.

