

**GRUPO I
GRUPO DE ESTUDOS DE GERAÇÃO HIDÁULICA – GGH**

DESCARGAS PARCIAIS EM GERADORES – A EXPERIÊNCIA DE ITAIPU

SIMAO Filho, José * Itaipu	HENNING, Juan Carlos Itaipu	BRITO, Geraldo Carvalho Itaipu
LATINI, Marcelo Fabiano Itaipu	CHILAVERT, Milquiades Itaipu	MACHADO, Waldimir Batista Itaipu
FARIA, Roberto Censi Itaipu		LEVY, Alain François S. CEPEL

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar a experiência de Itaipu em monitoramento de descargas parciais, obtidas através dos resultados de testes realizados, nos geradores da empresa, ao longo dos últimos sete anos.

PALAVRAS CHAVE

Monitoramento, Descargas Parciais, Hidrogeradores

1.0 INTRODUÇÃO

Desde 1997 o corpo técnico de Itaipu em parceria com o CEPEL, vem fazendo testes com sistemas de medição que se propõem a monitorar de forma “on-line”, descargas parciais em geradores. Durante este período foram testados sistemas de quatro fornecedores diferentes.

Cabe ressaltar, inicialmente, que os geradores de Itaipu têm uma particularidade em relação aos de outras usinas. Todas as conexões de cabeça de bobina permitem acesso à parte “viva” (cobre) do enrolamento. Portanto foi possível simular a existência de defeito, injetar sinais e instalar acopladores em qualquer ponto do enrolamento. Esta característica viabilizou a realização dos testes que foram divididos basicamente em três etapas, resumidas a seguir.

Na primeira etapa, período de 1997 e 1998, foram testados dois sistemas que não apresentaram resultados satisfatórios, devido à quantidade e à localização de acopladores capacitivos. Esta etapa de estudos foi tema de artigo apresentado no XV SNPTEE de 1999 e no I ENAM. Por isso neste trabalho será apresentado apenas um resumo desta primeira etapa.

Na segunda etapa de testes foi feito um levantamento da resposta em frequência ao longo do enrolamento estatístico de um dos geradores, com o objetivo de levantar as curvas de atenuação e definir qual seria a melhor faixa de frequência de medição e configuração de acopladores, tanto com relação a quantidades como localização, para os geradores de Itaipu.

Na terceira etapa foram testados, separadamente, sistemas de mais dois fabricantes diferentes. De posse dos resultados obtidos nas duas etapas anteriores, foram instalados, estrategicamente, acopladores em vários pontos de um mesmo ramo de uma das fases do gerador, com o objetivo de avaliar os sistemas testados quanto a capacidade de detecção de defeitos e filtragem de ruídos. Nesta etapa, houve simulação de defeito com máquina girando e excitada com tensão próximo a nominal de trabalho.

Este trabalho tem por finalidade mostrar os resultados globais destas experiências, destacando os aspectos positivos e negativos observados durante os testes, sem, no entanto, entrar em detalhes sobre as características específicas de cada um dos sistemas testados.

2.0 CARACTERÍSTICAS DOS GERADORES DE ITAIPU

Cada gerador de Itaipu tem capacidade para geração de 700 MW de potência. A Tabela 1 mostra um resumo de suas principais características.

TABELA 1 – Principais características dos geradores de Itaipu

CARACTERÍSTICA	50 Hz	60 Hz
Tensão nominal	18 kV	18 kV
Corrente nominal	24 kA	26 kA
Potência	823 MVA	735 MVA
Refrigeração	água	Água
Ranhuras	504	504
Barras	1008	1008
Circuitos	6 por fase	6 por fase
Altura do núcleo	3,5 m	3 m
Pólos	66	78
Diâmetro interno estator	16 m	16 m
Isolação	classe F	Classe F

O enrolamento estatórico destas máquinas é constituído por 1008 barras do tipo Roebel distribuídas em seis circuitos paralelos por fase. Cada circuito é composto por 56 barras conectadas em série. A refrigeração do enrolamento é feita com a circulação de água desmineralizada e desionizada através de condutores ocultos inseridos nas barras. Existem 168 circuitos de água para refrigeração. Cada circuito percorre 6 barras do enrolamento. A conexão hidráulica entre os condutores ocultos é feita junto a conexão elétrica entre barras. Para facilidade de manutenção estas conexões ficam protegidas por uma capa extraível de material isolante. Uma vez retirada uma destas capas é possível ter acesso a parte viva (cobre) do enrolamento em qualquer das cabeças de bobina do estator (ver Figura 1).



FIGURA 1 - Conexão hidráulica dos circuitos de refrigeração

Graças a esta particularidade, foi possível conectar os acopladores para medição de DP e os defeitos simulados em qualquer ponto do enrolamento.

3.0 PRIMEIRA ETAPA DOS TESTES

Em 1997 e 1998 foram testados dois sistemas de monitoramento. O resultado destes testes já foram apresentados no I ENAM e no XV SNTPEE, portanto aqui faremos apenas um pequeno resumo do que foi encontrado na ocasião.

Três pedaços de barras foram preparados pelos fabricantes, simulando defeitos conhecidos: descarga de ranhura (barra 1), delaminação (barra 2) e corona (barra 3).

Estes defeitos simulados, quando testados isoladamente fora do enrolamento apresentaram descargas parciais da ordem de: barras 1 e 2 – 20.000 pC e barra 3 – 11.000 pC.

A configuração dos sistemas previa a instalação de quatro acopladores no gerador, sendo um em cada fase, posicionado no cubículo de surto e outro na saída de neutro posicionado no cubículo de neutro do gerador, conforme figura 2.

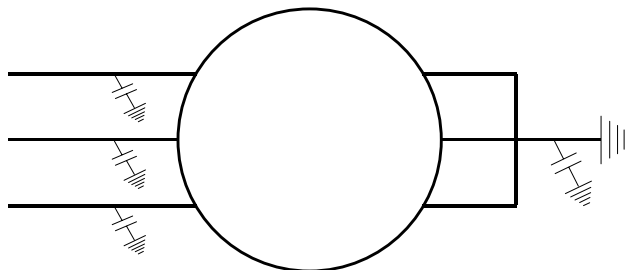


FIGURA 2 - Configuração dos sistemas testados na primeira etapa dos testes.

A Figura 3 mostra um esquemático do circuito de teste.

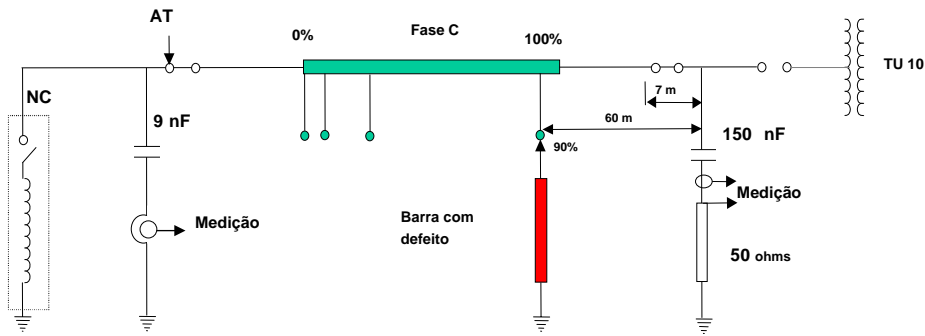


FIGURA 3 - Circuito de teste

As barras com defeitos foram inseridas, uma por vez, nas posições de 0%, 10%, 30% e 100% do enrolamento. Em cada situação foi aplicada tensão nominal fase terra através do terminal de neutro do enrolamento. Em nenhum dos casos os sistemas conseguiram detectar qualquer sinal de descarga.

Na seqüência, com o objetivo de verificar a influência do “bus duct”, os acopladores foram instalados internamente ao enrolamento e os testes foram refeitos. Cabe ressaltar que esta não era a configuração original dos sistemas. Nesta condição os sistemas conseguiram detectar os sinais gerados pelos defeitos simulados, constatando que o “bus duct” interfere negativamente na medição. Através destes últimos testes foi possível observar a atenuação do sinal causada pelo próprio enrolamento estático, conforme mostrado na Figura 4

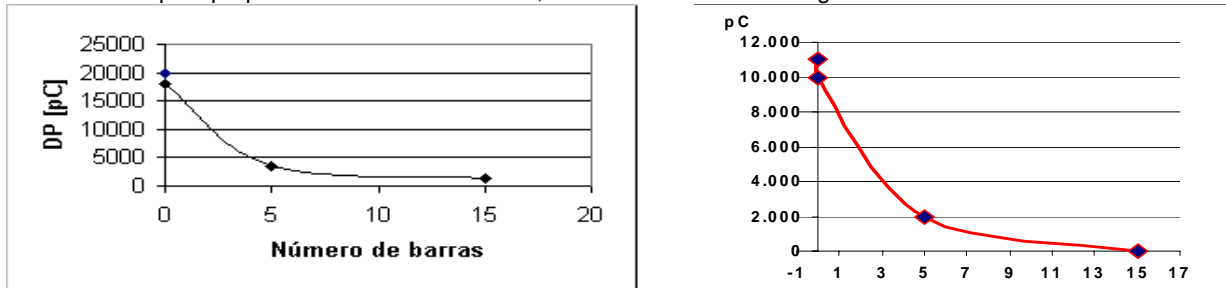


FIGURA 4 - Gráficos de atenuação do sinal de DP

O primeiro ponto do gráfico no eixo das DPs corresponde ao valor medido com a amostra fora do enrolamento. Só pelo fato de conectar as barras no enrolamento o sinal sofreu uma atenuação de aproximadamente 10% do seu valor inicial. A medida que o acoplador era afastado da posição do defeito a atenuação se tornava bem mais acentuada. Com apenas cinco barras do enrolamento (10%) o sinal foi reduzido para aproximadamente 20% do valor inicial.

4.0 SEGUNDA ETAPA DOS TESTES – RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO ENROLAMENTO.

Em função dos resultados obtidos na primeira etapa optou-se por não instalar qualquer dos sistemas propostos. Porém ficou definido internamente na empresa, continuar com as pesquisas no sentido de se elaborar uma especificação para um sistema que pudesse atender as necessidades de monitoramento dos geradores.

Dentro da linha de pesquisa adotada, através da parceria com o CEPEL, foi iniciado um trabalho de levantamento da resposta em frequência do enrolamento, visando determinar qual seria a melhor faixa de frequência a ser medida, bem como a quantidade ideal de acopladores e sua localização dentro do enrolamento. Esta segunda etapa foi concluída em novembro de 2001.

Como já foi mencionado anteriormente, devido às facilidades apresentadas pelo projeto dos geradores de Itaipu, foi programada uma seqüência de atividades experimentais envolvendo diversos procedimentos para simulação de sinais de descargas parciais e diversos instrumentos de medição. Basicamente os dispositivos utilizados para geração de sinais de DP foram geradores de degrau e um centelhador desenvolvido pelo CEPEL.

Para aquisição dos sinais foram utilizados dois acopladores capacitivos, sendo um de 1 nF e outro de 10 nF, conectados a instrumentos de medição tais como osciloscópio, analisador de espectro e medidor de DP.

Os testes foram realizados em várias baterias. Em cada uma delas se fixava o acoplador e o instrumento de medição em um determinado ponto, enquanto que o defeito era movimentado ao longo do enrolamento. Em cada posição do defeito eram feitas as medições. Nas outras baterias o conjunto de medição era relocado para outro ponto e as medições repetidas. A Figura 5 mostra um esquemático do circuito de medição.

As respostas em frequência foram adquiridas nas faixas de 0 a 100 MHz, de 0 a 20 MHz e de 0 a 6 MHz.

A célula de carga, quando testada externamente ao enrolamento, apresentou níveis de descargas entre 12.000 e 19.000 pC, dependendo da faixa de frequência de medição.

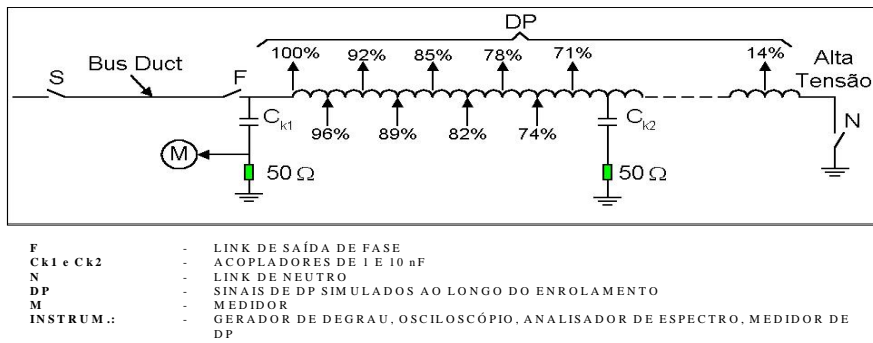


FIGURA 5 - Esquemático do circuito de medição e célula de carga

A Figura 6 mostra a resposta através do acoplador de 10 nF instalado na posição de 89% do enrolamento, enquanto que a célula de carga usada para simulação de defeito foi instalada em diversas posições do enrolamento.



FIGURA 6 - Exemplo de resposta obtida durante os testes

No exemplo do gráfico a curva identificada por a0989c89 corresponde a resposta em frequência com o acoplador e o defeito posicionado em 89% do enrolamento. Para as outras curvas o acoplador se manteve na mesma posição enquanto que os dois algarismos finais indicam a posição em que se encontrava o defeito.

De uma forma geral foi possível confirmar que a atenuação dos sinais de DP tende a se acentuar com o aumento da faixa de frequência, ou seja, há melhor sensibilidade nas faixas de frequências mais baixas.

Não há uma proporcionalidade bem definida em termos da atenuação dos sinais de DP ao longo do enrolamento, pelo contrário, diversos pontos possuem ressonâncias em algumas frequências específicas.

Em todos os casos registrados ocorreu uma atenuação significativa das componentes de frequência a partir de 40 MHz. Assim, faixas de frequência de medição inferiores a 40 MHz são mais indicadas nesse caso.

Para verificação da influência do "bus duct" nas medições, uma fonte de descarga produzida por centelhamento foi mantida na posição de 100% do enrolamento, enquanto que as medições foram realizadas nesta posição e na posição S da Figura 5 (cubículo de surto, fora do gerador). Dependendo da frequência de medição os sinais tiveram atenuação da ordem de 85 a 91%.

Esta etapa dos testes mostrou que a medição é mais adequada quando realizada em frequências menores, havendo algumas alternâncias de comportamento nas regiões até cerca de 20 a 30 MHz. Frequências inferiores a 1 ou até 2 MHz não são normalmente consideradas devido à grande variedade de ruídos ali existentes. Assim, não se tem em princípio, nenhuma razão para se fazer a medição de descargas parciais fora dessa faixa indicada. Para se ter maior flexibilidade de análise, seria mais conveniente que o sistema de medição pudesse dispor de três a quatro faixas de medição na região entre 2 e 30 MHz (algumas possibilidades para essas faixas são: 2 a 12 MHz; 8 a 20 MHz e 12 a 30 MHz)

Quanto à posição dos acopladores ao longo do enrolamento, observou-se uma sensível melhoria na sensibilidade quando estes se encontravam nas posições correspondentes a 89% e 50% do enrolamento. A posição correspondente a 50% possui menor solitação elétrica das barras e logo, não justifica-se dispor um acoplador nessa posição. Porém a posição correspondente a 89% é um ponto propício para instalação de um acoplador.

A entrada da fase é sempre um ponto clássico para a colocação de outro acoplador visto ser um ponto comum aos vários circuitos de uma mesma fase. Esse ponto se refere à entrada da fase geometricamente próximo ao gerador e não após o "bus duct", junto ao cubículo de surto ou outro ponto distante do enrolamento.

Devido à geometria dos enrolamentos estáticos, existe um acoplamento capacitivo importante entre os diversos circuitos e fases do gerador. Pôde-se verificar que, embora os sinais acoplados na fase adjacente sejam de menor intensidade, este acoplamento também contribui para as formações dos perfis de atenuação e resposta em frequência dos sinais de descargas ao longo do enrolamento. Assim as DPs eventualmente registradas por um acoplador numa determinada fase, poderia estar sendo gerado em outra fase adjacente. Então, para que se possa

ter maior potencial de análise quanto à procedência das descargas parciais, o sistema de medição deve apresentar a distribuição das descargas parciais em função de sua posição angular no ciclo da tensão à frequência industrial.

Quanto ao efeito de radiação dos sinais observou-se que as componentes diretamente radiadas na vizinhança de sua origem podem ser de elevadas intensidades, fazendo com que haja maior sensibilidade de detecção de sinais de descargas parciais sem que sua origem possa ser claramente identificada. Conforme a posição das descargas em meio ao enrolamento estático, sua influência na medição poderá ser mais ou menos intensa, correspondendo a mais um parâmetro de incerteza no processo de avaliação. Portanto, conclui-se que os acopladores fisicamente mais próximos dos defeitos têm mais chance de captá-los. Esse resultado faz com que se torne mais adequado posicionar o conjunto dos acopladores das três fases de tal forma que estes permaneçam uniformemente espaçados entre si.

5.0 TERCEIRA ETAPA DOS TESTES

Concluída a segunda etapa foram iniciadas negociações com três empresas fornecedoras para testar seus sistemas de monitoramento de DP nos geradores de Itaipu. Das três empresas contactadas apenas duas se mostraram interessadas em participar dos testes. Os dois sistemas testados tiveram comportamento semelhante. Neste trabalho serão apresentados somente os resultados obtidos com um dos sistemas testados. Infelizmente, até a data que este trabalho foi escrito, a outra empresa ainda não apresentara o relatório com a análise dos resultados.

Os testes foram realizados em maio e setembro de 2003. O objetivo principal era avaliar os sistemas comercializados quando a capacidade de filtragem de ruídos e detecção de defeitos localizados.

Em função dos resultados obtidos nas duas etapas anteriores, ficou definida uma configuração de testes com a instalação de vários acopladores ao longo de uma das fases do enrolamento estático. A configuração adotada está apresentada esquematicamente na Figura 7.

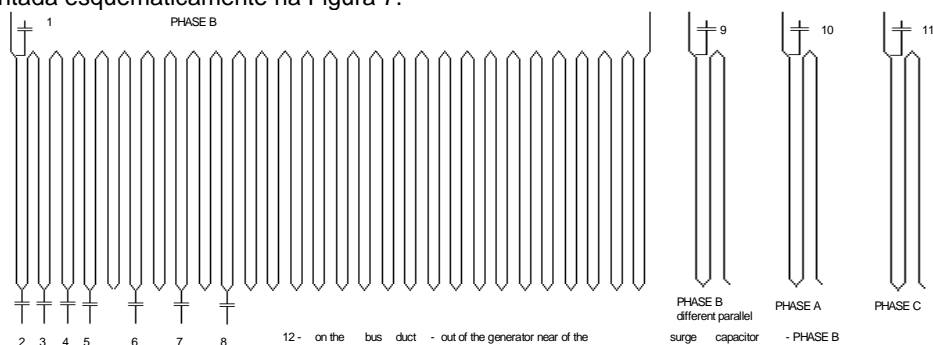


FIGURA 7 - Diagrama esquemático da instalação dos acopladores

Os testes desta etapa foram divididos basicamente em três partes. A primeira parte como gerador parado e simulação de defeitos com aplicação de tensão no enrolamento. Na segunda parte o gerador foi monitorado em operação em três condições de carga: a vazio com tensão nominal; sincronizado com 700 MW de carga, a frio e a temperatura estabilizada. E na terceira parte, defeitos simulados foram inseridos no enrolamento com o gerador em operação com tensão nominal, porém não sincronizado ao sistema elétrico.

Inicialmente o equipamento de aplicação de tensão foi testado quanto a geração de DP. Os resultados indicaram que o equipamento de alta tensão não gera sinais de DP que poderiam interferir no resultado final dos testes.

Na seqüência os defeitos simulados também foram testados com o objetivo de determinar os níveis de DP gerados.

Nesta etapa não foi utilizado o gerador de pulso como simulação de defeito. Um pedaço de barra do enrolamento estático simulando uma descarga de ranhura foi preparada para uso nos testes, juntamente com a célula de carga das etapas anteriores. A foto desta barra se encontra na Figura 8.

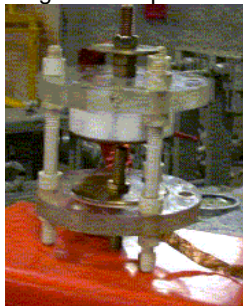


FIGURA 8 - Célula de carga e barra com defeito simulado

Nos testes feitos com máquina parada, as simulações feitas com a célula de carga apresentaram valores de DP

bastante elevados quando medido pelos acopladores junto a ela. Os valores extrapolaram a escala do instrumento de medição. Portanto os gráficos correspondentes a estes resultados não serão apresentados neste trabalho.

A Figura 9 mostra os resultados das simulações com máquina parada, utilizando-se a amostra de barra defeituosa, posicionada ora junto ao acoplador C2 e ora próximo ao C8.

Alguns acopladores estão conectados a barras que compartilham a mesma ranhura. Por exemplo os acopladores 4 e 7 estão conectados a barras que compartilham a ranhura 243, o mesmo acontecendo com os acopladores 5 e 6 cujas barras compartilham a ranhura 217. O acoplamento capacitivo entre barras de mesma ranhura, justifica a elevação do nível de descarga medido pelo acoplador C4, em relação a C6 e C5, quando o defeito é posicionado no acoplador C8. Este fato vai ficar evidenciado em todos os resultados apresentados daqui para frente.

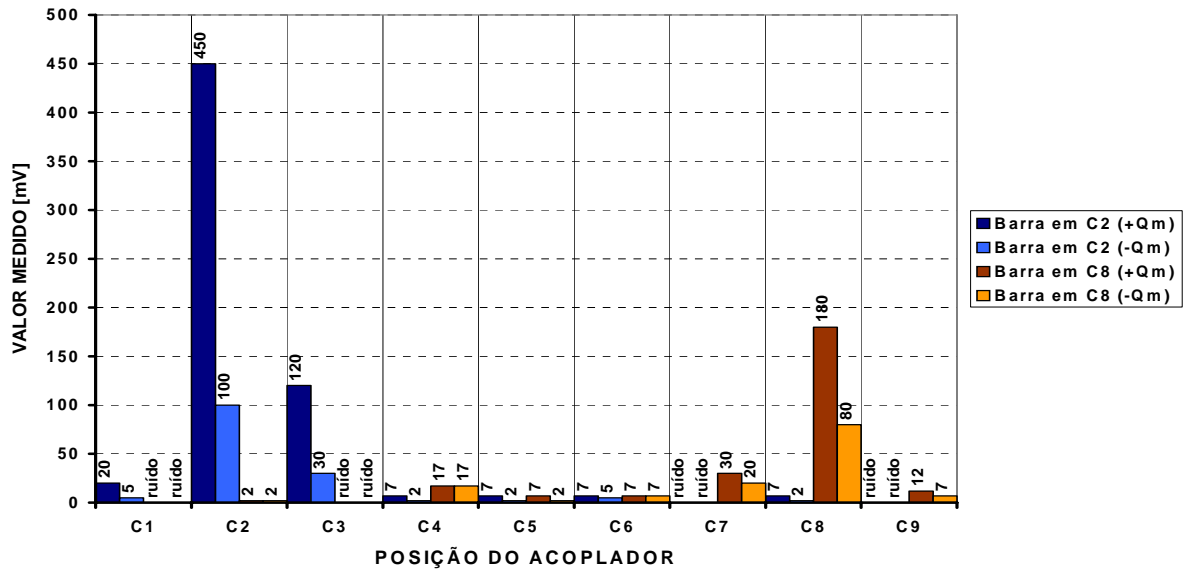


FIGURA 9 - Teste com máquina parada – defeitos posicionados em C2 ou C8

O gráfico da Figura 10 mostra o resultado das medições das descargas naturais do gerador, em três condições diferentes, ou seja, sincronizada com 700 MW de carga (com enrolamento frio e temperatura estabilizada) e com 500 MW de carga (temperatura estabilizada).

Os valores medidos indicam que os sinais de DP se alteram com as condições térmicas e de carga do enrolamento, o que sugere que as medições periódicas devam ser realizadas sempre nas mesmas condições operativas. Esta característica também pode ser utilizada para avaliar o estado de fixação das barras dentro das ranhuras.

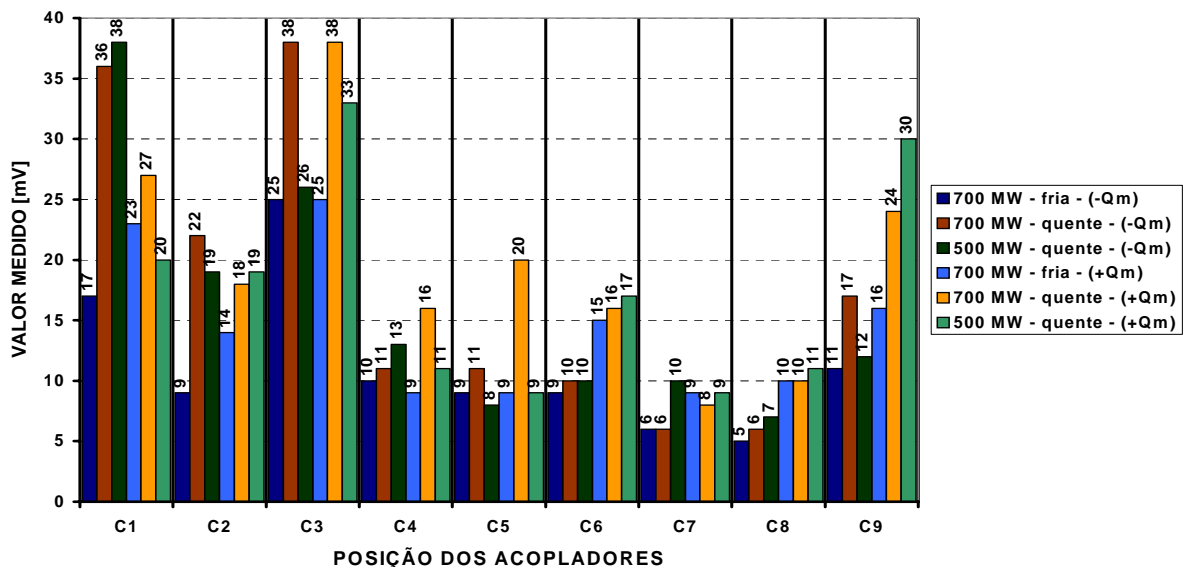


FIGURA 10 - Medições com máquina sincronizada – 700 MW (fria e quente) e 500 MW (quente), sem defeito

Já o gráfico da Figura 11 mostra os resultados da mesma medição anterior, porém ressalta as características do sistema testado em eliminar as interferências externas.

Como pode ser observado pelo gráfico, os sinais originais medidos pelos acopladores C1 e C9 eram maiores do que aqueles apresentados após a filtragem. Em função das posições e dos níveis de sinal registrados pelos acopladores C10, C11 e C12, pode-se supor que a filtragem se apresenta eficiente neste sistema.

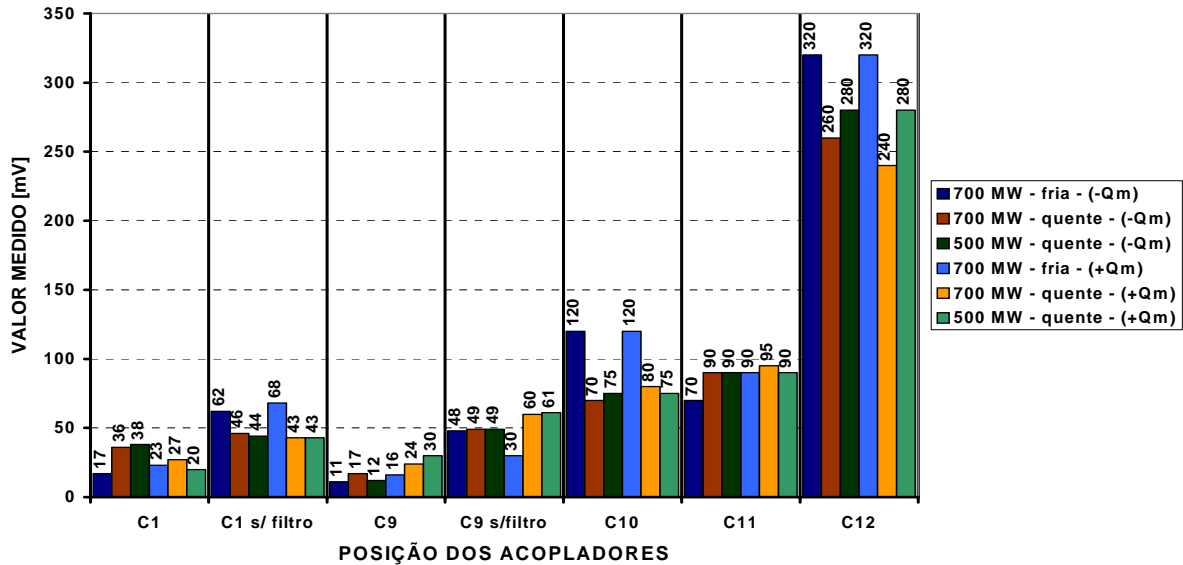


FIGURA 11 - Idem Figura 10, com e sem utilização de filtragem de ruído

E por último o gráfico da Figura 12 mostra os resultados das medições com o gerador em operação excitado com tensão terminal de 11,4 kV e defeito simulado conectado junto ao acoplador C8. Nesta situação o gerador não estava sincronizado com o sistema elétrico. Nesta condição foram feitas medições com o gerador sem o defeito conectado (com 13,8 kV) e com defeito (11,4 kV) para se compararem os resultados.

Pode ser claramente observado, pelo gráfico, a atenuação do sinal gerado junto ao acoplador C8. Já nos acopladores C7 até o C1 os sinais não tiveram variações significativas, porém está claro que estes valores eram relativos ao defeito simulado, já que os valores medidos quando o gerador estava sem o defeito conectado foram menores.

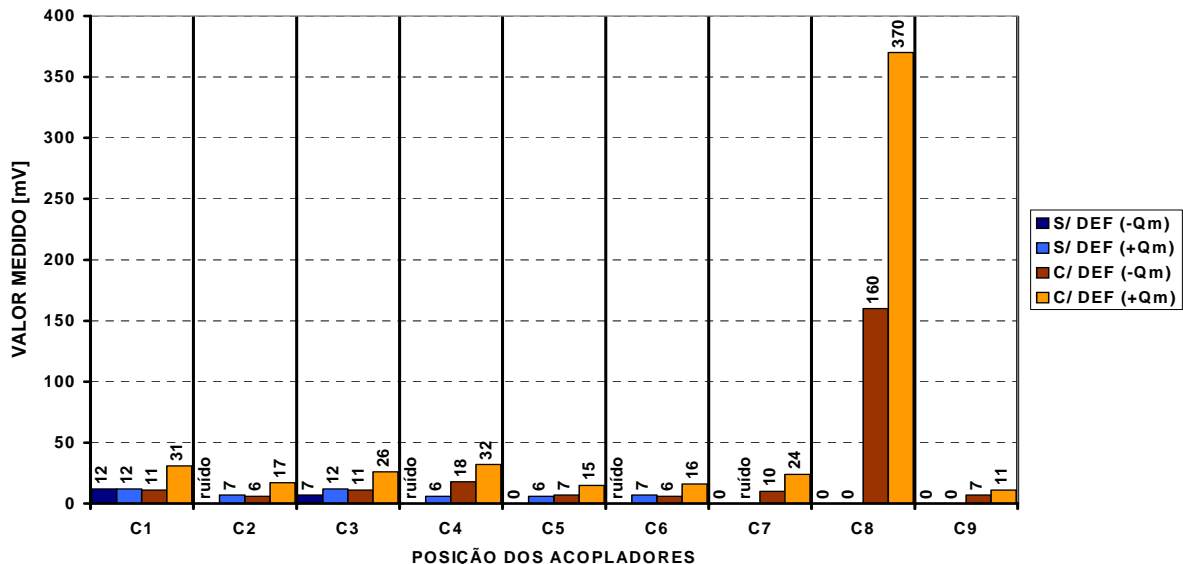


FIGURA 12 - Medições com máquina girando excitada não sincronizada - com e sem simulação de defeito

6.0 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos nas duas primeiras etapas deste projeto, foi possível concluir que:

- Existe uma atenuação significativa na condução dos sinais gerados por DP, ao longo do enrolamento estatórico;
- Os sinais de DP são transmitidos via condução e radiação;
- Os acopladores e enrolamento funcionam também como antenas, captando os sinais irradiados;
- Os acopladores devem ser instalados internamente ao enrolamento estatórico;

Já na terceira etapa dos testes, quando foram testados dois sistemas disponíveis comercialmente, de fabricantes diferentes, ficaram evidentes as seguintes constatações:

- Defeitos simulados com um nível de descargas parciais da ordem de 6.000 pC (calibrado externamente e inserido no enrolamento estatórico), puderam ser detectados por ambos sistemas testados. Cabe ressaltar que durante os testes não foi possível reduzir o nível de descarga gerada pelo defeito simulado, para avaliar a sensibilidade dos sistemas testados;
- Com a utilização de um osciloscópio, também foi possível detectar o defeito simulado e eliminar ruídos externos ao enrolamento estatórico;
- O sistema foi capaz de detectar os sinais de DP naturais e aqueles gerados pelo defeitos simulados;
- Foram detectados ruídos provenientes do “bus duct”. O sistema foi capaz de identificar e isolar estes ruídos;
- Os sinais de DP naturais do gerador são muito pequenos, se comparados com o banco de dados do fabricante do sistema. Isto significa que, para o fabricante do sistema, o gerador testado está com a isolação em boas condições;
- A atenuação do sinal de DP é bastante acentuada ao longo do enrolamento;
- Ambos sistemas testados foram eficientes para eliminar interferências externas.
- Nos acopladores mais afastados, os defeitos foram detectados, porém, com intensidade muito baixa. Portanto num caso real de defeito pontual, dependendo da intensidade e do local onde esteja ocorrendo, sua detecção pode ser inviabilizada;
- Defeitos incipientes pontuais dificilmente serão detectados e localizados pelos sistemas de monitoramento testados, a não ser que ocorram próximos a um dos acopladores.
- Existe um acoplamento capacitivo bastante significativo entre barras instaladas dentro da mesma ranhura, o que por um lado pode dificultar a localização de um defeito, mas por outro lado contribuir para definição de quantidades e localização dos acopladores;
- Os sistemas de monitoramento de descargas parciais disponíveis no mercado podem ser úteis para avaliação do estado geral da isolação e a tendência de deterioração generalizada;
- Os fabricantes sugerem que o monitoramento de DP poderia ser útil para avaliar o estado de limpeza do enrolamento estatórico. Teoricamente isto faz sentido, uma vez que os níveis de corona, descargas superficiais e entre fases nas cabeças de bobinas tem relação com teor de contaminação da isolação. Na prática seria necessário formar um banco de dados a médio/longo prazo para se ter segurança na avaliação;

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Levy, Alain F. S., et al. Medição da resposta em freqüência no enrolamento estatórico de unidade geradora da Usina de Itaipu – Relatório Técnico ACET 779/99, CEPEL, Rio de Janeiro, RJ. 1999.

Levy, Alain F. S. et al. Medição da resposta em freqüência no enrolamento estatórico de unidade geradora da Usina de Itaipu, segunda parte – Relatório Técnico ACET 1077/01, CEPEL, Rio de Janeiro RJ. 2001.

Latini, Marcelo F., et al. Medição de descargas parciais em hidrogerador da Usina de Itaipu – uma avaliação experimental das limitações, dificuldades de medição e interpretação dos resultados. Itaipu Binacional. XV SNPTE, GRUPO I, Foz do Iguaçu, PR. 1999.