



Delaminação em Barras Estatóricas Reserva da Itaipu Binacional: UM ESTUDO DE CASO

Marco A. S. Mauro, Nilton Quoirin, Armando Ortiz, Juan C. Henning

Itaipu Binacional

Paraguay, Brasil

RESUMO

A Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHI) é atualmente responsável por 19% da energia consumida no Brasil e 77% da energia consumida no Paraguai. Suas unidades geradoras foram instaladas em duas etapas, a primeira na década de 1980, que contemplou dezoito unidades, e a segunda na década de 2000, com mais duas unidades, totalizando 14.000 MW. Este trabalho apresenta uma avaliação do estado das barras estatóricas reserva das unidades geradoras da Itaipu Binacional, bem como das suas condições de armazenamento e dos procedimentos internos para ensaios pré-instalação. A manutenção de um estoque de barras reserva em boas condições é de fundamental importância para o pronto atendimento em caso de sinistros de pequeno porte em unidades geradoras, contribuindo para a minimização do tempo de parada e para o rápido reestabelecimento da unidade geradora. A usina hidrelétrica de Itaipu possui cerca de 900 barras estatóricas reserva no seu almoxarifado. No final de 2009, devido à falta de dois tipos de barras especiais para a unidade U18A, recentemente instalada na usina, foram enviadas ao fabricante barras reserva para modificação que consistia na inversão da conexão elétrica. Estes dois novos tipos de barras estatóricas foram agregados ao projeto original devido à necessidade de modificação da disposição do enrolamento estatórico, visando minimizar os níveis de vibração, detectados durante a fase de comissionamento, que estavam acima dos especificados no projeto. Durante os ensaios de rotina na fábrica antes da modificação, verificou-se que a isolação de algumas barras apresentava pontos com delaminação interna. Este problema foi observado através do ensaio de tapping, que consiste na aplicação de pequenas batidas com um pequeno martelo de aço inox em toda a parte reta da isolação da barra, verificando-se alguma mudança no som produzido. Uma vez detectado este problema no lote encaminhado à fábrica para a modificação, decidiu-se realizar o mesmo teste no almoxarifado da Itaipu para avaliar o estado de todas as barras reserva. Salienta-se que estas barras são da primeira fase de construção da usina, estando portanto armazenadas há cerca de 20 anos. Os testes, realizados ao longo de três meses, mostraram que grande parte das barras armazenadas apresenta pontos de delaminação na sua isolação. Diante desta situação, deu-se início a uma investigação para averiguar as causas e consequências da delaminação da isolação. Foram realizados diversos ensaios em laboratório. Algumas barras foram dissecadas para avaliar a profundidade e o tamanho das áreas com defeito. A composição, o teor de resina e o grau de cura do material retirado durante a dissecação foi analisado por meio de ensaios químicos. Um outro conjunto de barras, composto por amostras boas e amostras com delaminação, foi submetido a ensaios de envelhecimento elétrico. As barras foram ensaiadas até a ruptura de suas isolações. Comparou-se o número de horas necessárias para a ruptura das barras em bom estado e das barras com delaminação. Em paralelo a estes testes, foram reavaliadas as condições de armazenamento das barras no almoxarifado da usina. Por fim, efetuou-se ainda uma revisão dos procedimentos de ensaios das barras estatóricas antes da instalação nas unidades geradoras.

PALAVRAS CHAVES: Gerador, barra estatórica, reserva, delaminação, armazenamento.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

1. INTRODUÇÃO

A usina hidrelétrica de Itaipu possui 20 unidades geradoras de 700 MW, sendo 10 de 50 Hz e 10 de 60 Hz. As unidades U01 a U18 foram instaladas entre 1984 e 1991. Em 2006 e 2007 entraram em operação as unidades U9A e U18A.

Em 2009, devido à falta de dois tipos de barras especiais no estoque reserva da Itaipu Binacional, foram enviadas barras comuns para modificação na fábrica. Esta modificação consiste na inversão da conexão elétrica das barras. Estes dois novos tipos de barras estáticas surgiram devido à necessidade de modificação do enrolamento estático visando minimizar os níveis de vibração, detectados durante a fase de comissionamento, que estavam acima dos especificados no projeto.

A Figura 1 apresenta um desenho das barras estáticas comuns e das barras estáticas especiais.

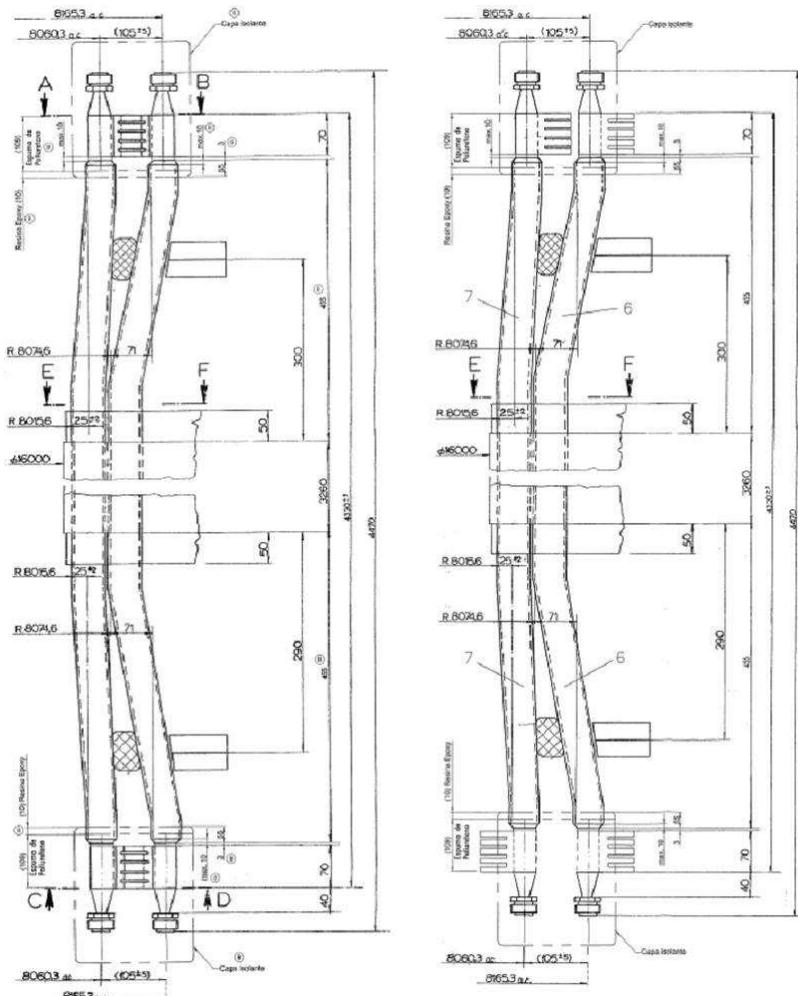


Figura 1 - Barras comuns (esquerda) e barras especiais (direita)



X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

Antes de efetuar a modificação, o fabricante submeteu as barras reserva enviadas aos ensaios iniciais de tapping, tensão aplicada e descargas parciais.

O teste de tapping consiste na avaliação da isolação da parte reta da barra através de pequenas batidas com um martelinho. Com base no som produzido pela batida do martelo, o executor do ensaio analisa o estado da isolação. É importante salientar que este ensaio tem como fim uma avaliação qualitativa e orientativa e que não existe uma norma brasileira ou internacional que defina procedimentos de realização deste ensaio.

Durante o ensaio de tapping realizado na fábrica, constatou-se que diversas barras apresentavam pontos com som distinto, indicando possível problema na isolação da barra. Diante desta constatação, decidiu-se realizar o ensaio de tapping em todas as barras estatóricas reserva da Itaipu Binacional. A Itaipu mantém no seu almoxarifado cerca de 900 barras estatóricas desde o final da primeira fase de montagem das unidades geradoras, isto é, há cerca de 20 anos. Os testes foram realizados no almoxarifado da usina e levaram cerca de 3 meses. Verificou-se que cerca de 80% das barras de um determinado fabricante testadas apresentou pontos com som distinto no ensaio de tapping.

Diante desta situação, surgiram diversas dúvidas sobre a causa e a consequência dos possíveis defeitos encontrados com o teste de tapping. Este ensaio indica uma degradação da isolação das barras? O procedimento de armazenamento das barras adotado pela Itaipu é adequado? Em caso de necessidade de reparo, as barras com delaminação podem ser instaladas nas unidades geradoras? Qual é o risco de utilização destas barras com isolação delaminada?

2. DESENVOLVIMENTO

Para responder a estes questionamentos, foi realizada uma pesquisa utilizando barras do estoque reserva da Itaipu. Foram selecionadas 8 barras estatóricas, das quais 2 apresentavam isolação em boas condições e 6 apresentavam delaminação. As 6 barras com delaminação foram divididas em 4 do tipo A e 2 do tipo B. As barras do tipo A apresentaram delaminações maiores e mais evidentes. Já as barras do tipo B possuem pontos de delaminação menores.

A pesquisa consistiu nas seguintes etapas:

2.1 Ensaios iniciais efetuados em todas as barras

2.1.1 Avaliação dimensional

O primeiro teste realizado foi a medição da largura das barras. O objetivo desta medição foi avaliar se a isolação das barras sofreu algum tipo de deformação durante o período de aproximadamente 20 anos de armazenamento no almoxarifado da Itaipu, o que poderia comprometer a instalação das barras nas ranhuras do estator.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

2.1.2 Descargas parciais

O ensaio de descargas parciais visa avaliar o estado da isolação, fornecendo informações sobre possíveis espaços vazios, delaminações ou descolamentos no interior da isolação.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma IEEE 1434 [1]. Cada barra foi posicionada em cima de dois cavaletes que possuem, na sua parte superior, uma placa de cobre aterrada. O nível de pico das descargas parciais foi registrado aplicando-se a tensão nominal fase-fase (18 kV). A medição foi feita utilizando um capacitor de acoplamento Tettex de 4000 pF. Para avaliação das barras, foi adotado o limite máximo de descargas parciais utilizado pelo fabricante para barras novas de 5000 pC.

2.1.3 Tensão aplicada

O ensaio de tensão aplicada foi realizado após a medição de descargas parciais. A tensão foi aumentada até 37,5 kV e mantida durante um minuto. Durante este período, verificou-se se havia a presença de ruído audível elevado ou de descargas elétricas superficiais.

2.2 Envelhecimento elétrico acelerado

O ensaio de envelhecimento elétrico (VET – Voltage Endurance Test) foi realizado até a ruptura da isolação das barras, tendo como objetivo avaliar a influência das delaminações na vida útil das mesmas. Para o ensaio foram selecionadas 6 barras contendo a seguinte amostragem: 2 barras boas e 4 barras com delaminação, sendo 2 com média incidência e 2 com alta incidência.

As barras foram divididas em 2 lotes contendo uma barra boa, uma com média incidência e uma com alta incidência de delaminação, conforme mostra a Tabela I. Todas as barras foram submetidas ao ensaio até ocorrer a ruptura da isolação.

Tabela I – Lotes para ensaio de envelhecimento elétrico

Lote	Número de série	Classificação
I	10564	Boa – Sem Delaminação
	02522	Média Delaminação
	00652	Alta Delaminação
II	13011	Boa – Sem Delaminação
	10689	Média Delaminação
	00628	Alta Delaminação

A Figura 2 mostra o arranjo do ensaio.



Figura 2 – Arranjo adotado para o ensaio de envelhecimento elétrico

Segundo o critério do programa B (250 h) da norma IEEE 1553 [2], a tensão de ensaio deve ser de 45,8 kV. Já em relação à temperatura de ensaio foi acordado entre as partes (fabricante e Itaipu) que deveria permanecer controlada em 110 °C. Após a conclusão do ensaio no primeiro lote de barras, reduziu-se a temperatura para 60 °C com o propósito de eliminar uma possível influência da temperatura na ruptura da isolamento das barras.

Após o ensaio, efetuou-se a dissecação das barras para avaliar o local de ruptura da isolamento.

2.3 Ensaio químicos: calcinação, perda de massa e avaliação do grau de cura

De forma a avaliar o estado dos componentes da isolamento das barras e verificar uma possível degradação, foram efetuados os ensaios de calcinação, perda de massa em estufa (baseado no método da IEC 60216) e avaliação do grau de cura. Como estes ensaios são comparativos, foram separadas duas barras para avaliação, uma boa (número de série 02948) e uma com regiões de grande delaminação (número de série 10528). Estas barras não foram submetidas ao ensaio de envelhecimento elétrico.

2.3.1 Calcinação

O objetivo do ensaio de calcinação é determinar o teor de orgânicos na isolamento das barras.

2.3.2 Perda de massa

O ensaio de perda de massa em estufa baseado no método IEC 60216 foi realizado para definir a classe e estabilidade térmica do material. O teste é feito expondo as amostras a temperaturas elevadas, medindo a perda de massa em função do tempo.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

2.3.3 Avaliação do grau de cura

A avaliação do grau de cura da isolação das barras foi realizada através das técnicas de DSC (calorimetria exploratória diferencial) e TG (termogravimetria). Foram retiradas amostras de três regiões da isolação: a parte interna (próxima ao cobre), a parte intermediária e a parte externa (mais superficial). O ensaio de DSC consiste na medição da energia liberada pelo processo de cura em função da temperatura. O ensaio de termogravimetria, complementar à técnica de DSC, consiste em medir a perda de massa em função da temperatura e do tempo.

3. RESULTADOS

3.1 Avaliação dimensional

A Figura 3 mostra o resultado das medições das dimensões das barras e uma comparação com a largura especificada ($33,5 \pm 0,15$ mm). Observa-se que os valores encontrados foram, na sua grande maioria, consistentes com a especificação de largura da barra.

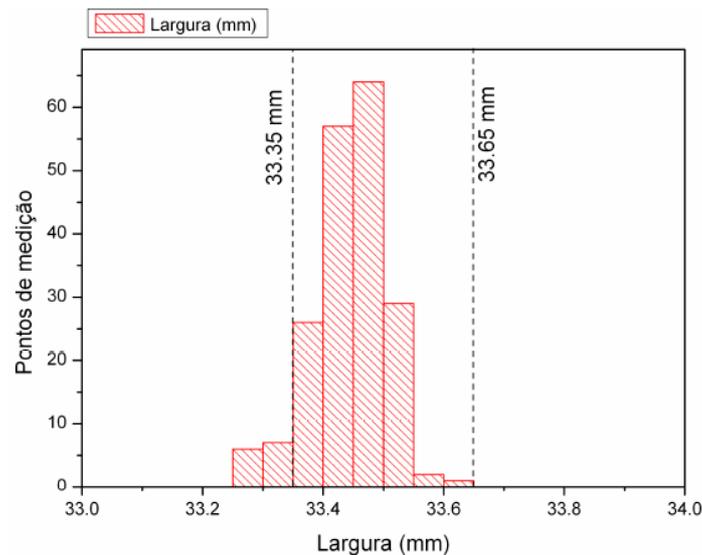


Figura 3 – Medições da largura das barras

3.2 Ensaio elétrico

A

Tabela II mostra um resumo dos ensaios elétricos realizados. Todas as barras foram aprovadas no teste de tensão aplicada, feito com 37,5 kV. Apenas uma barra (n.s. 10528) apresentou um nível de descargas parciais acima de 5000 pC, referência do fabricante para aprovação de barras

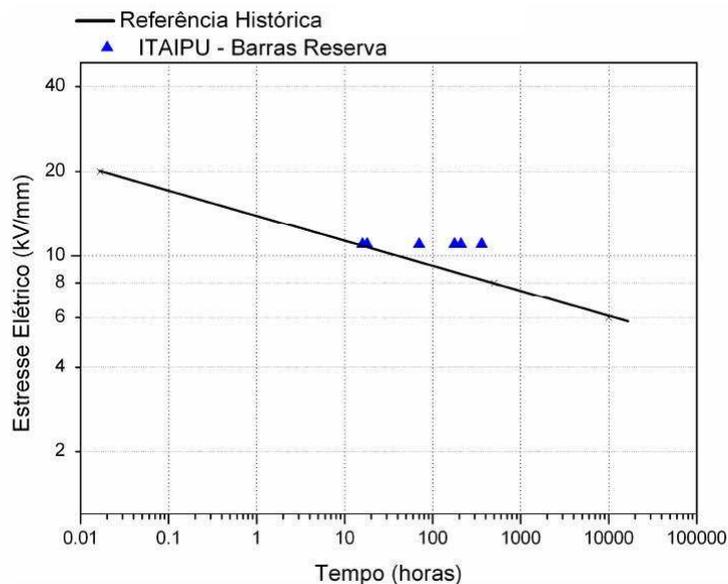
X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
 19, 20 y 21 de setiembre de 2012

novas. No entanto, o fabricante considerou que este resultado não deve ser usado de maneira isolada para rejeitar a barra, e sim em conjunto com os resultados dos outros testes.

Tabela II – Resumo dos ensaios elétricos

Lote	N. série	Classificação tapping	Tensão aplicada	VET	DP [pC]
I	10564	Boa – Sem delaminação	OK	209h / 110°C	150
	02522	Média delaminação	OK	18h / 110°C	4000
	00652	Alta delaminação	OK	360h / 110°C	700
II	13011	Boa – Sem delaminação	OK	178h / 60°C	180
	10689	Média delaminação	OK	70h / 60°C	1500
	00628	Alta delaminação	OK	16h / 60°C	4500
Químico	02948	Boa	OK	-	400
	10528	Alta delaminação	OK	-	7000

A coluna VET da tabela apresenta o número de horas decorridas até a ruptura da barra no ensaio de envelhecimento elétrico. Para avaliar estes resultados, o fabricante apresentou uma referência histórica para o tipo de isolamento usada originalmente nas barras estatóricas de Itaipu. A referência apresenta o estresse elétrico (em kV/mm) suportado em função do número de horas do ensaio. Foram marcados os resultados do ensaio de envelhecimento acelerado utilizando a espessura da isolamento das barras da Itaipu (4,15 mm) e a tensão aplicada (45,8 kV), que fornecem um valor de 11 kV/mm para as barras ensaiadas. Como mostra a Figura 4, os pontos indicam que as barras apresentaram um nível de suportabilidade compatível com o projeto original do sistema de isolamento existente nos anos 70-80.





Comité Nacional Paraguay



Unión de Ingenieros de ANDE

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

Figura 4 – Avaliação dos resultados do ensaio de VET

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

3.3 Inspeção visual

Depois de efetuado o ensaio de envelhecimento elétrico como descrito no item 2.2, realizou-se uma inspeção visual nas 6 barras submetidas ao teste, observando o local de ruptura da isolação. Em 5 das 6 barras, a ruptura da isolação ocorreu no final da barra, na região de sobreposição da proteção anti-corona (ECP) com a isolação da parte reta. A perfuração da isolação neste local é comum, uma vez que nesta região da barra, a maior concentração de linhas de campo elétrico submete a isolação a um desgaste maior. Somente na barra restante (n.s. 13011), deu-se a ruptura da isolação no meio da parte reta da barra. Cabe salientar que em nenhuma das 6 barras o local de ruptura da isolação coincidiu com uma região de delaminação.

3.4 Dissecação

Feita a inspeção visual, foram retiradas 3 amostras para dissecação. A primeira amostra foi retirada da barra 652, contendo uma região com delaminação. Também da barra 652, retirou-se a segunda amostra com o local de ruptura da isolação da barra. A terceira amostra foi retirada da barra 13011, contendo o ponto de perfuração da isolação no meio da barra.

Em primeiro lugar foi dissecada a amostra com delaminação. Não encontrou-se qualquer sinal de descarga elétrica. Tampouco foi observada nenhuma diferença entre as regiões com delaminação e as regiões adjacentes.

Em seguida realizou-se a dissecação das amostras com os locais de perfuração da isolação. Verificou-se que a descarga percorre a isolação superficialmente e atravessa-a de maneira transversal até uma quina da seção transversal do cobre, região de maior concentração de campo elétrico. Não foi notado nada de anormal na região da perfuração. A mica apresentou-se bem impregnada e sem rugas muito grandes.

3.5 Ensaio químicos

Todos os ensaios químicos realizados apresentaram resultados muito semelhantes para as duas barras selecionadas. O ensaio de calcinação mostrou que as duas barras apresentam teores de orgânicos muito similares.

De acordo com o fabricante, a estabilidade térmica das barras tipo A e B foram similares e os valores de perda de massa podem ser considerados não-significativos. A diferença de perda de massa entre as amostras pode ser considerada normal.

No ensaio de calorimetria diferencial, observou-se que as barras com e sem delaminação apresentaram curvas energia liberada x temperatura muito similares. Esta constatação também é válida para as amostras retiradas das regiões intermediária e externa da isolação.

O ensaio de termogravimetria, complementar à técnica de DSC, apresentou perfis de degradação térmica muito parecidos para os dois tipos de barra.



X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

4. CONCLUSÕES

Os ensaios efetuados em 8 barras reserva, armazenadas no almoxarifado da Itaipu Binacional há cerca de 20 anos, tiveram como objetivo avaliar, através de testes dimensionais, elétricos e químicos, o estado da isolação das barras e verificar uma possível degradação nos locais detectados como pontos suspeitos através do teste de tapping.

Os resultados das avaliações dimensionais demonstraram que, apesar do armazenamento por mais de 20 anos, as barras estatóricas reserva não sofreram alterações na espessura de isolação.

O ensaio de envelhecimento elétrico acelerado apresentou valores entre 16 e 360 h. O fabricante apresentou um gráfico de referência da tecnologia de isolação da época de fabricação (anos 70-80) que fornece o nível de estresse elétrico (em kV/mm) suportado em função do tempo de aplicação da tensão. Com base nesta referência, as barras foram consideradas aprovadas pelo fabricante. É importante destacar que, embora aprovadas pelo fabricante, as barras 02522 e 00628 apresentaram níveis de suportabilidade muito abaixo das demais barras. Sobrepondo os pontos referentes a estas duas barras no gráfico da referência histórica, nota-se que os pontos encontram-se numa região de limiar de aprovação, devendo-se considerar um pequeno desvio da curva de referência como aceitável.

Nota-se, ainda, uma correspondência entre um maior nível de descargas parciais e um menor número de horas até atingir a ruptura da isolação, especialmente para as barras 02522 e 00628. No entanto, é clara a falta de correlação entre o grau de delaminação encontrado no teste de tapping e o nível de suportabilidade no ensaio de envelhecimento elétrico.

Devido à correlação observada entre o nível de descargas parciais e o número de horas necessárias para a ruptura da isolação, efetuou-se uma revisão do procedimento interno da Itaipu de ensaio de barras estatóricas antes da instalação em uma unidade geradora. Acrescentou-se à instrução de manutenção o ensaio de descargas parciais para avaliar as barras, além do ensaio de tensão aplicada que o procedimento já incluía.

Além dos testes elétricos, foram realizados ensaios químicos em amostras de uma barra boa e de uma barra com delaminação. Todos os ensaios (calcinação, perda de massa e avaliação do grau de cura) indicaram uma grande similaridade entre os dois tipos de amostras.

A inspeção das barras após o ensaio de envelhecimento elétrico mostrou que os locais de perfuração da isolação não tiveram qualquer relação com os pontos com delaminação detectados através do teste de tapping. Além da inspeção das barras, foi realizada uma dissecação para comparar amostras com e sem delaminação. Com a dissecação, verificou-se que a isolação dos locais com delaminação não apresenta nenhuma diferença significativa em relação às regiões sem delaminação. Tampouco foram observados sinais de descarga elétrica nas regiões com delaminação.

Levando em consideração a falta de correlação dos locais de perfuração elétrica com os pontos de delaminação, bem como o bom estado da isolação indicado pela inspeção visual e pelos ensaios químicos, considera-se que a detecção de tinido no ensaio de tapping (possível delaminação) não deve ser considerada um critério de rejeição das barras reserva.



**X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012**

Por último, con base nos resultados contidos neste relatório, conclui-se que a isolação das barras com delaminação armazenadas no almoxarifado da Itaipu não apresenta características diferentes das barras sem delaminação. Os ensaios não detectaram mecanismo de degradação significativo nas barras com delaminação. Portanto, as barras reserva armazenadas no almoxarifado da Itaipu estão aptas a serem usadas em caso de necessidade de reparo das unidades geradoras, em qualquer posição do enrolamento estatórico. Para instalação das barras reserva, deverão ser usados como critérios de aprovação os ensaios de tensão aplicada e descargas parciais descritos na instrução de manutenção correspondente.

De forma a manter as barras reserva em bom estado e evitar uma degradação devido aos fatores ambientais, foi solicitada, inicialmente, a aquisição de quatro containers climatizados. Os containers foram especificados para armazenar 70 barras em um ambiente com temperatura e umidade controlada. Os containers deverão conter um número mínimo de cada tipo de barra, de forma a possibilitar um reparo em caso de substituição de uma barra estatórica de fundo.

5. REFERÊNCIAS

- [1] The Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery, New York, IEEE Std. 1434-2000.
- [2] The Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Standard for Voltage Endurance Testing of Form-Wound Coils and Bars for Hydrogenerators, New York, IEEE Std. 1553-2002.