



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

FI/GGH/15
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

ANÁLISE DA CONDIÇÃO DO ISOLAMENTO DE GERADORES COM ENROLAMENTO DE ARMADURA REFRIGERADO A ÁGUA

**Marco Aurélio Siqueira Mauro(*)
ITAIPU BINACIONAL**

**Dr.Marcelo Jacob da Silva
VOITH HYDRO LTDA**

**Dr.Edson da Costa Bortoni
UNIFEI**

RESUMO

Vários estudos, realizados em enrolamento convencionais, sugerem que o envelhecimento do isolamento como uma das causas de falha no enrolamento estatórico. Dentre as possíveis fontes de falha podemos destacar descargas parciais, ciclagem térmica, sobrecarga, afrouxamento da fixação e contaminação por umidade, sendo a ciclagem térmica com maior potencial de contribuição em máquinas do tipo motor-gerador (que possuem elevado número de partidas e paradas).

O trabalho apresenta a experiência na avaliação do estado atual da isolação de um gerador da Itaipu refrigerado a água com aproximadamente 20 anos de operação, tentando responder se o sistema de refrigeração a água traz maiores benefícios ao gerador que os sistemas convencionais a ar.

PALAVRAS-CHAVE: Vida Útil, Remanescente, Enrolamento Estatórico, Água Pura, Envelhecimento Elétrico, Fator de Perda ($\tan \delta$), Descargas Parciais

1.0 - INTRODUÇÃO

A operação confiável de um gerador depende diretamente da integridade da isolação do seu enrolamento estatórico, que é envelhecido por exposição a uma combinação de tensões térmicas, elétricas, mecânicas e ambientais. A deterioração contínua do isolamento do estator pode vir a resultar em uma falha que implica em indisponibilidade indesejada do gerador por um longo período de tempo.

O grande dilema a ser respondido pelos especialistas das equipes de manutenção é se a condição atual do equipamento apresenta sinais de degradação que possam colocar em risco a sua operação?

Segundo Sierra e Pérez-Arriaga [1] a vida útil dos equipamentos está diretamente associada à qualidade da manutenção atribuída a ele. Porém a redução da vida útil de geradores se deve a diversos fatores, tais como carregamento, modo de operação, falhas internas, condições mecânicas, vibração e contaminação. Modelos denominados multi-stress têm sido propostos por pesquisadores de vários países, dentre os quais se podem destacar os trabalhos de Srivinas e Ramu [2], Bartnikas e Morin [3][4], e de Jia et alii [5].

Basicamente, existem dois tipos de métodos para avaliar a condição de isolamento do enrolamento estatórico: o método direto e o método indireto. A avaliação direta da integridade de um sistema de isolamento pode ser obtida pela tensão de ruptura, determinada através de ensaios destrutivos, o que prejudica a integridade do enrolamento e requer um longo tempo de preparação, ensaio e avaliação. Já uma avaliação indireta de um sistema de isolamento pode ser obtida por ensaios não destrutivos, o que mantém a integridade do isolamento do enrolamento sob

investigação. No entanto, a credibilidade em estimar a condição do isolamento utilizando estes ensaios não destrutivos deve estar bem correlacionada com os resultados dos ensaios de degradação.

A Usina Hidrelétrica de Itaipu, que possui uma potência instalada de 14.000 MW, com capacidade de geração anual, nos últimos 10 anos, superior a 87.000.000 MWh, com recorde registrado em 2013 com a geração de 98.630.035 MWh [6], e com responsabilidade sócio-ambiental de destaque para os dois países, Brasil e Paraguai, consorciados neste empreendimento, tem despertado para a verificação do estado atual de seu principal ativo, os geradores elétricos. Dentre as diversas ações em andamento, pode-se destacar as atualizações/modernizações que são implementadas nos principais equipamentos da unidade geradora seja por aspectos de manutenibilidade, obsolescência ou fim de vida útil. Porém, até o momento não se tem qualquer plano de ação vinculado ao gerador em si, quer seja no rotor ou estator.

Frente às dificuldades encontradas até então em medição de descargas parciais (DP) nos enrolamentos estatóricos e à aproximação dos 30 anos de operação de algumas unidades geradoras de Itaipu é oportuno e estratégico estudar o estado atual da isolação dos enrolamentos estatóricos utilizados nestas unidades.

Os geradores das unidades geradoras de Itaipu foram fornecidos por dois grandes fabricantes, Siemens e BBC, cujas tecnologias de projeto, fabricação e montagem atualmente estão sob responsabilidade das empresas Voith Hydro e Alstom, respectivamente.

A proposta para análise do estado atual da isolação será a utilização de inspeção (avaliação dimensional, tapping e microscopia), ensaios elétricos (DP, tensão aplicada (TA) e envelhecimento elétrico acelerado) e ensaios químicos (calcinação, perda de massa e avaliação do grau de cura).

Por motivos de disponibilidade de material (barras estatóricas retiradas de unidades geradoras após longo tempo de funcionamento) neste trabalho será realizado um estudo direcionado ao fabricante Voith Hydro (com tecnologia de isolação originária da Siemens). Em oportunidade futura, quando for possível disponibilizar barras estatóricas ABB, será uma grande oportunidade estender o trabalho ao fabricante Alstom/BBC nos mesmos moldes e condições adotadas e aplicadas neste trabalho.

2.0 - SISTEMAS ISOLANTES DE BARRAS DO ESTATOR E A TEORIA DOS MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO

Os enrolamentos de estatores de hidrogeradores, compostos por barras, são expostos a diversos tipos de solicitações. Dependendo das particularidades do projeto, como tamanho, capacidade, geometria, tensão de serviço e regime operativo, a intensidade relativa das solicitações varia substancialmente, definindo, desta maneira, o elemento principal de degradação. [7]

De um modo geral, os esforços que atuam no sentido de degradar a isolação são os elétricos, mecânicos, térmicos e ambientais.

2.1. Esforços Elétricos

Os esforços que ocorrem na região entre a fase do cobre e superfície externa do isolamento serão aqui denominados como “Esforços Internos”, enquanto aqueles que ocorrem ao longo da superfície da bobina serão denominados “Esforços Externos”.

2.1.1. Esforços Elétricos Internos:

Contribuem para a destruição da estrutura do material isolante devido à presença de campo elétrico na isolação. A isolação sólida da barra no estator é, na grande maioria dos equipamentos, uma composição de camadas de mica natural, e algum elemento de adesão como epóxi, poliéster, asfalto, laca. Estes sistemas, durante o processo de fabricação ficam sujeitos à presença de vazios ou impurezas (material estranho à isolação) em seu interior. Estas imperfeições intrínsecas ao processo de fabricação, representam alterações em regiões do meio dielétrico, determinando descontinuidade nos níveis de campo elétrico ao longo do material com elevação acentuada deste campo elétrico entre as paredes, podendo ocorrer, dependendo da forma da cavidade, material do dielétrico envolvente, tensão aplicada e do gás ali presente, a disrupção parcial, denominada “descarga parcial”, provocando alterações na estrutura do material da região. Devido à característica não regenerativa dos dielétricos sólidos, tais descargas possuem um efeito cumulativo e, portanto, poder de agressão proporcional à energia envolvida no processo. Estes esforços (stress) elétricos denominados “internos” possuem intensidade máxima no trecho reto da barra, principalmente na região da ranhura, sendo atenuados na cabeça da bobina, conforme ilustrado na Figura 1. O “stress” elétrico numa parede isolante da bobina estatórica pode ser descrito como o aproximadamente representado na Figura 2. [7]

2.1.2. Esforços Elétricos Externos:

São os esforços que atuam na superfície da bobina com ataque sobre os materiais de acabamento e sistema de supressão de descargas parciais. Os geradores que operam com tensão terminal superior a 4 kV são susceptíveis a descargas no interior da ranhura, originadas de contato não adequado entre a barra e a parede do núcleo magnético. Alguns alternadores dispõem de uma pintura com condutividade controlada que desempenha a função de descarregamento e equalização de potencial na face externa da bobina, dispostos conforme ilustra a Figura 1. A

presença da descarga nesta zona leva à deterioração destes sistemas ou dos materiais de acabamento e fixação da bobina, implicando em aumento das folgas laterais e aumento de sua incidência, caracterizando novamente o efeito cumulativo. Outra forma de ação agressiva do tipo superficial ocorre na região das cabeças de bobina, são as descargas de saída de ranhura, conhecidas como efeito corona, por serem de fácil visualização. Estas descargas tem origem na distorção das linhas do campo elétrico na saída do núcleo e estabelecem um gradiente de potencial na superfície da bobina, que pode ultrapassar a suportabilidade máxima do meio dielétrico ambiente, estabelecendo portanto, a descarga parcial. Torna-se sensível em geradores com tensões superiores a 10 kV. Os fabricantes adotam sistemas especiais instalados em forma de anel na bobina, junto à saída do núcleo com capacidade de controlar o alívio de tensão nesta região e estabelecer o gradiente de potencial compatível com o meio dielétrico, conforme ilustrado na Figura 3.[7]

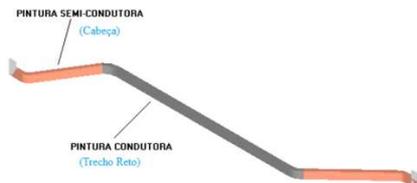


FIGURA 1 – Croquis de uma Barra Estatórica típica.

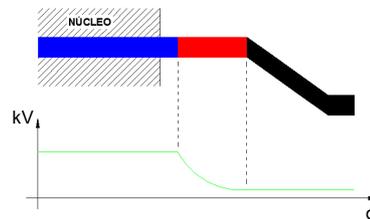


FIGURA 2 – Distribuição da tensão de stress na bobina [8].

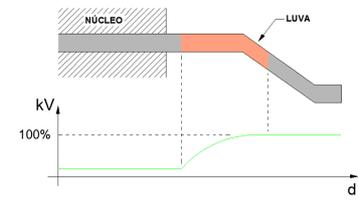


FIGURA 3 – Gradiente de Tensão na Cabeça de Bobina [7].

2.2. Esforços Mecânicos

O enrolamento do estator é submetido principalmente a dois tipos de esforços de natureza mecânica. O primeiro, fortemente caracterizado por fadiga e ruptura, tem origem no ciclo térmico ao qual está submetido o equipamento. O segundo, proveniente de interação magnética entre condutores, núcleo e polo, se identifica por movimentos oscilatórios de frequência superior à industrial. Estes mecanismos têm ação distinta quando observados em ranhura ou cabeça de bobina.

2.3. Esforços Térmicos

Os materiais isolantes em serviço devem suportar, um período extremamente longo, se solicitados a trabalhar dentro do limite térmico para o qual foram especificados. A sobretemperatura tende a promover a alteração irreversível na estrutura do material que compõe a isolação, sendo os efeitos mais comuns observados: delaminação, fraturas, despolimerização, desplastificação e fragilização.

O mecanismo de falha por ação de sobretemperatura é de fácil controle, bastando para tal a vigilância dos limites operacionais da máquina. A operação fora destes limites conduz a alterações estruturais que, em última análise, estarão desqualificando o material isolante em suas propriedades físico-químicas.

2.4. Agressões Ambientais

Máquinas que operam com sistema de ventilação “aberto” apresentam normalmente forte contaminação da bobina e núcleo por pó e óleo, que aderem ao conjunto atacando os materiais da bobina, obstruindo dutos de ventilação, aumentando o “stress” nas cabeças de bobina. Já as máquinas verticais em circuito fechado têm sido fortemente atacadas por condensação do vapor de óleo proveniente de mancais, que aderem ao pó de lonas de freio, formando uma pasta condutiva no nível das cabeças de bobina, atacando e modificando os sistemas das pinturas anti-corona. Este efeito causa a degradação prematura das cabeças de bobina.

Máquinas em ambiente selado, com presença de descargas parciais estão predispostas a formação de ozônio, que em presença do nitrogênio reage formando ácido nítrico, de alto poder corrosivo, que ataca o núcleo magnético e estruturas metálicas do compartimento da máquina.

3.0 - ENROLAMENTO ESTATÓRICO DOS GERADORES DE ITAIPU

O enrolamento estatórico das UGs da Usina de Itaipu é do tipo ondulado, composto de 1008 barras dispostas em 504 ranhuras. Estas barras, por sua vez, são constituídas internamente por 30 condutores elementares isolados entre si, sendo seis destes condutores ocios, permitindo a circulação de água pura, conforme mostrado na Figura 4 e Figura 5, configurando 2 circuitos distintos denominados de circuito elétrico e circuito hidráulico.

O circuito elétrico tem as mesmas características dos utilizados em geradores convencionais. Já o circuito hidráulico tem a peculiaridade de conter como meio refrigerante um fluido que tem por finalidade controlar a temperatura do enrolamento estatórico, através da circulação forçada deste fluido refrigerante pelas barras estatóricas. Este fluido consiste em água desmineralizada, com maior grau de pureza possível, pH básico e baixos valores de condutividade, recebendo a denominação de “água pura”.

No caso de enrolamentos refrigerados a água pura, como os utilizados na Itaipu Binacional, com ciclagem térmica irrelevante, a contaminação por umidade também pode ser potencializada, e os ensaios de fator de perda ($\tan \delta$) e medição de resistência de isolamento, relativamente simples quando realizados em enrolamentos convencionais, se tornam elaborados e às vezes complicados de serem realizados devido ao efeito de polarização da água que “falseia” as condições dielétricas do enrolamento.



FIGURA 4 – Seção da barra estatórica

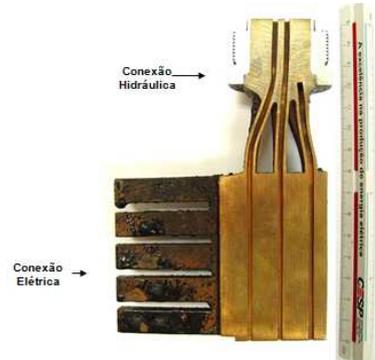


FIGURA 5 – Corte da cabeça da barra estatórica

4.0 - AVALIAÇÃO DA ISOLAÇÃO DO ENROLAMENTO ESTATÓRICO DA UG 10 DE ITAIPU

Para a avaliação da isolação de enrolamentos estatóricos pelo método direto dependemos da retirada de espécimes de um enrolamento em funcionamento para análise do estado atual da isolação, e dependendo do processo empregado para a fixação das barras no núcleo estatorico, que pode ser por calçamento lateral ou massa semi-condutiva, a retirada do espécime fica comprometida. Ou seja, se o processo utilizado for a fixação por massa semi-condutiva é mais difícil retirar-se um espécime integro para avaliação dada a forte fixação dos componentes no interior das ranhuras do estator, como mostra a Figura 6, onde algumas das barras removidas sofreram deformações.



FIGURA 6 – Barras retiradas da UG-10 após 19 anos de Operação

Tabela 1 – Nível de Tensão de Operação das Barras retiradas da UG10

		s/n	ranhura	tensão [V]
superior	P1	4457	23	577
superior	P1	4445	24	3526
superior	P1	4453	25	9279
superior	P1	4443	26	6310
superior	P1	4441		
superior	P1	4475		
superior	P3	4159	29	7980
superior	P1	4533		
superior	P1	4544		
superior	P1	4439		
superior	P1	4419		
superior	P1	4449		
inferior	P2	4333	30	371

Frente a isto se deve desenvolver um procedimento em que se permita avaliar, através de um corpo de prova confeccionado a partir destas barras retiradas, o estado da isolação deste enrolamento.

Para o estudo em questão utilizou-se barras retiradas da UG10 após um reparo que necessitou de substituição de uma barra de fundo por perfuração por corpo estranho, ocorrido em 30/04/2008. As barras disponibilizadas para estudo estavam em operação desde 01/09/1989, totalizando 19 anos de operação, e os níveis de tensão a que estavam submetidos são os elencados na Tabela 1.

Após avaliação dimensional das barras disponíveis, constatou-se que:

- 100% das barras, cujo comprimento da parte reta tem 3,26 metros, apresentam um corte na isolação na face estreita e estão deformadas (arco), fruto do processo de desmontagem das barras;
- A barra nº 4419 apresentava a isolação perfurada no meio da parte reta por ensaio de tensão aplicada realizado no laboratório da Usina de Itaipu, provavelmente oriundo de um dano mecânico na isolação causado pela remoção das barras do gerador;
- A possibilidade de confeccionar 05 (cinco) corpos de prova onde fosse possível submeter 50cm da

isolação a avaliação da condição atual, o que resultou em um corpo de prova de aproximadamente 170 cm de comprimento, conforme ilustra a Figura 7.

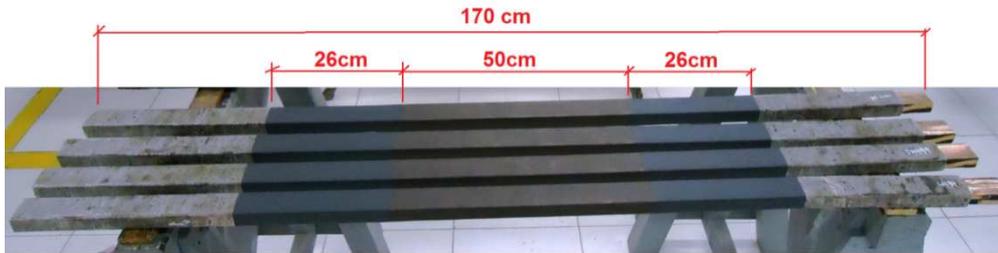


FIGURA 7 – Corpos de Prova para avaliação da Isolação

A fim de realizar a avaliação efetiva da isolação sem que parâmetros externos influenciassem os ensaios, fez-se necessários as seguintes ações:

- remoção da massa condutora e papel grafitado da parte reta utilizados na fixação da barra ao estator;
- aplicação de nova pintura condutora no trecho de isolação a ser avaliado (OCP ou Pintura Condutora, de coloração preta, constituído de uma pintura com verniz condutivo que tem como base resina alquídica);
- confecção de nova luva para equalização do gradiente de tensão, nas mesmas condições e com os mesmos materiais aplicados na barra original (ECP ou Pintura Semi-Condutiva, de coloração azul escuro, constituído de uma pintura com resinas alquídica e uréica dopada com carbeto de silício).

Após confecção de 5 corpos de prova idênticos, definiu-se o plano de trabalho para avaliação do estado atual da isolação das barras estatóricas retiradas de operação ilustrado na Figura 8.

Afim de levantar os padrões de resultados para os corpos de prova, realizou-se também a confecção de corpo de prova extraído de duas barras novas do estoque de Itaipu.

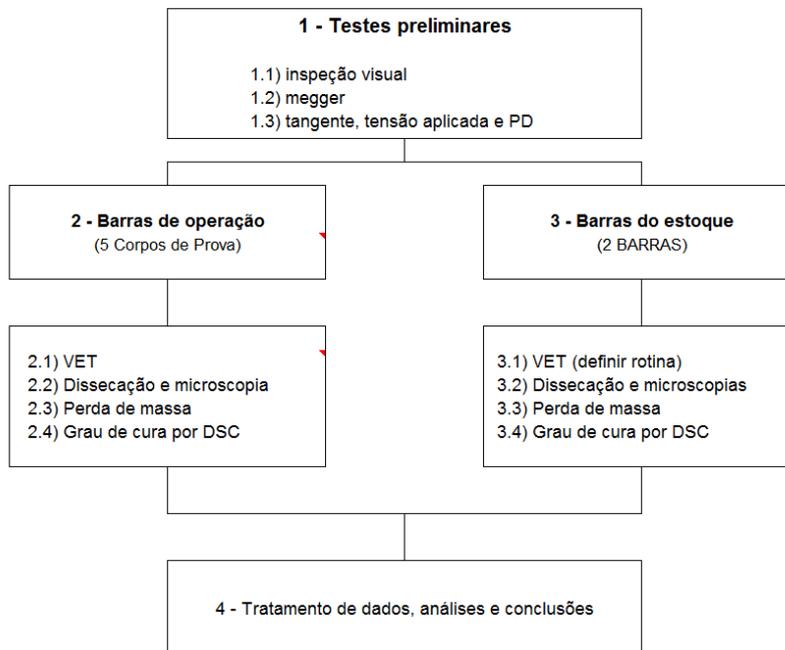


FIGURA 8 – Plano de estudo da condição atual da isolação das barras estatóricas dos geradores de Itaipu de fabricação Voith/Siemens

4.1. Inspeções:

A avaliação dimensional é realizada com o objetivo de avaliar a isolação das barras quanto à deformação, o que poderia indicar ou evidenciar absorção de umidade pela isolação. Nas barras disponibilizadas para avaliação as deformações observadas foram fruto do processo de retirada do enrolamento. Nos corpos de prova confeccionados não se constatou deformações.

A microscopia consiste na avaliação da isolação com o auxílio do microscópio, onde é possível identificar vazios e/ou delaminação na isolação. Para um bom acabamento na amostra a ser avaliada é essencial que cada etapa de

lixamento ou polimento seja executada cautelosamente. Foram retiradas 2 amostras, com 20 mm cada, da barra 4333 e efetuado o polimento com lixas gramatura 220, 400 e 600, ilustradas na Figura 9. Ao analisar as amostras no microscópio, ilustrado na Figura 10, constatou-se:

- 1) homogeneidade da isolação, não apresentando pontos de vazios e delaminações relevantes;
- 2) algumas porosidades na massa anticorona de preenchimento (mastic), o que é comumente observado neste componente;
- 3) alguns vazios pontuais que não influenciaram na degradação pela qualidade da isolação implementada nas barras em análise;
- 4) perfeita integridade das camadas de isolação, muito parecidas com as de uma barra nova (sem operação);
- 5) a definição de duas regiões: preta e cinza, que representam respectivamente mica e poliéster.

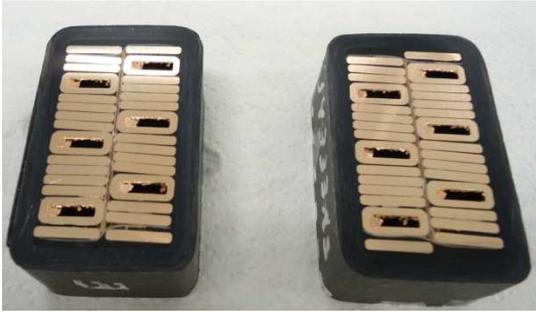


FIGURA 9 – Amostras preparadas para inspeção microscópica.



FIGURA 10 – Amostras preparadas para inspeção microscópica.

A dissecação da isolação foi realizada para verificar as partes internas quanto a aderência, carbonização e bolhas de ar. Ao realizar a dissecação tipo “peeling”, ilustrada na Figura 11, constatou-se:

- 1) boa aderência entre camadas;
- 2) ausência de carbonização entre camadas, o que afirma a não existência de vazios (bolhas de ar) na isolação, inclusive nas regiões curvas (finais das faces) que caracteriza-se pela intensificação do campo elétrico;
- 3) Todas as camadas apresentaram coloração semelhante, caracterizando uniformidade na impregnação;
- 4) boa aderência da mica com o cobre, verificando-se a presença de resina fortemente aderida ao cobre, indicando que o funcionamento não propiciou degradação da resina impregnante, o que está diretamente associado à temperatura de trabalho do enrolamento;



FIGURA 11 – Dissecação da Isolação.



FIGURA 12 – Perfuração por ensaio de tensão aplicada.

4.2. Ensaio Elétrico:

Para a determinação do Fator de Perdas Dielétricas (Tan Delta) em bobinas sobressalentes de máquinas elétricas, aplica-se na isolação da bobina ou barra uma tensão C.A. de 20 %, 40 %, 60 %, 80 % e 100 % da tensão nominal, e medem-se os respectivos valores de “Tan Delta” e “capacitância”. Realizou-se os ensaios de Tangente Delta e Descargas Parciais nos corpos de prova, confeccionados a partir das barras disponibilizadas para estudo, com os resultados apresentados nas Tabelas 2 e 3.

A calibração do sistema de medição de DP foi realizada com 500pC, registrando-se 31pC de ruído de fundo. A temperatura e umidade no instante do ensaio eram 24°C e 51%, respectivamente.

Como o ensaio de TA são normalmente realizados na ordem de $2 \cdot U_n$ (duas vezes a tensão nominal) e as amostras seriam submetidas ao ensaio de VET, num nível de tensão superior a $2 \cdot U_n$, considerou-se o primeiro minuto do VET como sendo o ensaio de TA.

Relembra-se que o processo de retirada proporciona deformação na parte reta e introduz ponto fraco na isolação exatamente no meio da barra.

Tabela 2 – Tangente Delta

Barra	Capac. (pF)	3,6 kV	7,2 kV	10,8 kV	14,4 kV	18 kV	21,6 kV	Beta	Psi
S1_4419 (Com Papel)		0,691	0,653	0,724	0,842	0,948	1	0,02	0,12
S1_4419 (Sem Papel)		0,757	0,713	0,756	0,862	0,962	1,03	0,00	0,11
4453	693	0,958	0,957	1,04	1,151	1,228	1,28	0,04	0,11
4475	692	0,915	0,917	1	1,102	1,181	1,231	0,04	0,10
4439	670	1,024	1,031	1,13	1,282	1,4	1,478	0,05	0,15
4449	681	1,226	1,21	1,25	1,29	1,33	1,35	0,01	0,04
14333_AS	683	0,93	0,914	0,921	0,942	0,971	1,002	0,00	0,03
14333_BS	662	1,422	1,422	1,451	1,498	1,538	1,568	0,01	0,05

Tabela 3 – Descargas Parciais

Barra	pC	
	10,4kV	18kV
S1_4419	620	560
4453	440	240
4439	274	197
4449	660	540
14333_AS	90	177
14333_BS	40	75

Tabela 4 – Ensaio de VET com aplicação de 39 kV (situação em 27/11/14)

Barra	Hinicial	Hfinal	Tempo	Status
4453	18076	21840	3764	broken
4439		22004	3928	running
4449		22004	3928	running
14333_AS		18643	567	broken
14333_BS		22004	3928	running

Para o ensaio de VET – Envelhecimento Elétrico por Tensão, que segundo norma IEEE 1553 estabelece níveis de $2,17 \cdot U_n / 400h$ e $2,54 \cdot U_n / 250h$, as barras deveriam suportar 39 kV por 400h ou 46 kV por 250h. Para o ensaio nos corpos de prova optou-se pela tensão de 39kV no intuito de aliviar a exigência nas luvas de proteção anti-corona e avaliar efetivamente a isolação do espécime. Os resultados levantados até o momento estão listados na tabela 4.

4.3. Ensaio Químicos:

De forma a avaliar o estado dos componentes da isolação das barras e verificar uma possível degradação, se efetua os ensaios de calcinação, perda de massa em estufa (método IEC) e avaliação do grau de cura, os quais são realizados de forma comparativa entre duas amostras.

O ensaio de calcinação possui como fim a quantificação do teor de orgânicos da isolação das barras.

O ensaio de perda de massa em estufa baseado no método IEC é 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.

A avaliação do grau de cura da isolação das barras é realizado através das técnicas de DSC (calorimetria exploratória diferencial) e TG (termogravimetria). Retira-se amostras de três regiões da isolação: a parte interna (próxima ao cobre), a parte intermediária e a parte externa (mais superficial). O ensaio de termogravimetria, complementar à técnica de DSC, consiste em medir a perda de massa em função da temperatura e do tempo.

Como os ensaios estão em andamento, os resultados ainda não podem ser compilados e analisados.

5.0 - CONCLUSÕES

Com a análise dos resultados obtidos as seguintes conclusões são possíveis:

1 - Os resultados de suportabilidade elétrica (tensão aplicada e envelhecimento elétrico), verificados até o momento, indicaram um comportamento compatível com o esperado para a tecnologia de isolação utilizado nas barras originais do projeto Itaipu (novas);

2 - Não foi detectado nenhum mecanismo de degradação que pudesse ter se desenvolvido durante os 20 anos de operação desta unidade geradora;

3 – O sistema de água pura responsável pelo resfriamento do enrolamento de armadura, associado ao regime de operação desta unidade geradora que apresentou, em média, uma parada a cada 7,35 dias, contribui positivamente na redução dos impactos relativos a ciclagem térmica do enrolamento, um dos principais responsáveis pela degradação da isolação principal do enrolamento;

4 – Pela análise realizada durante a dissecação tipo “peeling” e micrografia não constatou-se carbonização, bolhas de ar e falta de aderência entre as camadas de mica, inclusive com o cobre.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Sierra and I.J. Pérez-Arriaga, "Unity for All," IEEE Power and Energy Magazine. vol. 7, no. 5, pp. 18- 25, September/October 2009.
- [2] M.B. Srivinas, T.S. Ramu, "Multifactor Aging of HV Generator Stator Insulation Including Mechanical Vibrations," IEEE Transaction on Electrical Insulation, vol. 27, no. 5, pp. 1009-1021, October 1992.
- [3] R. Bartnikas and R. Morin, "Multi-Stress Aging of Stator Bars with Electrical, Thermal, and Mechanical Stresses as Simultaneous Acceleration Factors," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 4, pp. 702-714, December 2004.
- [4] R. Bartnikas and R. Morin, "Multi-stress aging of stator bars with electrical, thermal, and mechanical stresses as simultaneous acceleration factors," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 19, no. 4, pp. 702–714, Dec. 2004.
- [5] Z Jia, X Peng, Z Guan, L Wang and B Yue, "Evaluation of the Degradation of Generator Stator Ground Wall Insulation Under Multistress Aging," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, pp. 474-483, June 2008.
- [6] Itaipu Binacional. Disponível em <http://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>. Acesso em 18 de outubro de 2013.
- [7] P. M. S. Lara, "Aspectos Básicos do Projeto, Fabricação, Montagem, Funcionamento e Manutenção de Hidrogeradoras". Sinergia Engenharia e Consultoria Ltda, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2013.
- [8] N. D. Mora, J. F. R. Lucas, M. A. Maran, "Materiais Elétricos: Compêndio de Trabalhos". UNIOESTE – Universidade Federal do Oeste do Paraná/Campus de Foz do Iguaçu – LAMAT – Laboratório de Materiais, Foz do Iguaçu, Paraná, 2010.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Marco Aurélio Siqueira Mauro, nascido em Itajubá-MG em 1976. Graduado em engenharia elétrica na Universidade Federal de Itajubá em dezembro de 1998, com especialização em sistemas elétricos de potência com Ênfase em Geração, pela Universidade Federal de Itajubá em maio de 2013. Atualmente cursando o mestrando em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá.

Trabalha na Usina de Itaipu desde 2000 e atualmente atua no departamento de engenharia de manutenção como especialista em hidrogeradores.

Dr. Marcelo Jacob da Silva, nascido em Santo André-SP em 1972. Bacharel em Física pela Universidade Estadual Paulista – SP (1996). Mestre em ciências (1999) e Doutor em Física Aplicada pela Universidade de São Paulo – SP (2003). Atualmente é responsável pelos laboratórios de tecnologia de isolamento da Voith Hydro.

Dr. Edson da Costa Bortoni, nascido em Maringá-PR em 1966. Engenheiro Eletricista pela EFEI (1990), atual UNIFEI, mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos pela UNICAMP (1993), doutor em Sistemas de Potência pela EP-USP (1998), livre-docente pela EESC-USP (2012). Atualmente é professor na Universidade Federal de Itajubá, com pesquisas na área de instrumentação, geração de energia e sistemas de energia. Dr. Bortoni é um membro Fellow da ISA e membro Senior do IEEE e SPIE.