



GRUPO I
ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA (GGH)

AVALIAÇÃO DE ENVELHECIMENTO EM BARRAS DE ESTATOR DE HIDROGERADORES

André Pereira Marques*
CELG - Centrais Elétricas de Goiás S.A.

André Luiz Cardoso Rodrigues de Sá
ACS – Consultoria e Serviços Ltda

RESUMO

É apresentado neste trabalho o relato de pesquisa realizada em bobinas de estator de hidrogerador de 84 MW, 13,8 kV, fabricado em 1975.

Com o objetivo de avaliar o grau de envelhecimento da isolação do estator e determinar se a mesma ainda se encontrava em condições de operação, realizaram-se ensaios elétricos e físico-químicos.

A pesquisa foi motivada por alguns problemas que começaram a ocorrer com a isolação da máquina.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados constam do trabalho na forma de tabelas, gráficos e considerações.

PALAVRAS-CHAVE

Hidrogeradores – Envelhecimento – Degradação da isolação – Ensaios elétricos – Ensaios físico-químicos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Problemas apresentados no gerador envolvendo falha na isolação, levantaram suspeitas sobre a confiabilidade do sistema isolante das bobinas que compõem o estator.

Havia a hipótese de que as mesmas haviam chegado ao fim de vida útil, e que portanto o estator deveria ser rebobinado, uma vez que este tipo de falha já havia ocorrido em outra máquina com as mesmas características.

Com a repetição do problema, optou-se por desenvolver um estudo mais aprimorado para verificar as reais condições em que as bobinas se encontravam.

Foram separadas para estudo três bobinas completas, sendo uma sobressalente (bobina reserva nunca

utilizada), uma bobina em uso, retirada da máquina, e outra que havia sido envolvida na falha.

As bobinas foram separadas em seções, utilizadas para a realização de ensaios físico-químicos e elétricos.

Os resultados obtidos foram bastante conclusivos e são apresentados neste trabalho.

2.0. BREVE HISTÓRICO DA ISOLAÇÃO DE BOBINAS DE HIDROGERADORES.

Até 1960 os principais sistemas de isolação utilizados em geradores, eram compostos de fitas de papel e lâminas de mica aglutinadas com betume, sistema este denominado *Micafolium asfáltico*, ou, em menor escala de aplicação, o *Micafolium goma-laca*, no qual o betume asfáltico era substituído por uma resina natural. Estes sistemas de isolamento são limitados em sua utilização pela temperatura de trabalho que é de aproximadamente 95 °C, estando enquadrados na Classe Térmica “B”.

No início da década de 60 começaram a surgir os primeiros geradores compostos de folhas de mica, tecido de fibra de vidro impregnadas com uma resina sintética, neste caso poliéster, denominado *Micafolium poliéster* que possui propriedades isolantes e características térmicas melhores do que os sistemas anteriores, sendo enquadrado na classe térmica “F”.

Com o aperfeiçoamento das resinas sintéticas, a indústria eletro-eletrônica começou a aplicar como isolantes de bobinas de geradores, um composto de fitas de mica e resina epóxi, que possuem um desempenho muito superior, quando comparados aos primeiros de base asfáltica.

É sabido, tendo em vista a recente utilização de resinas sintéticas como isolantes de geradores, que são

* CELG – Centrais Elétricas de Goiás S.A.

poucas as informações sobre envelhecimento destes materiais, uma vez que agora é que se verifica o fim de vida dos primeiros geradores instalados no Brasil que utilizam estes materiais. Mesmo em nível mundial a utilização destes como isolantes de geradores é recente.

3.0 CONSIDERAÇÕES SOBRE A DECOMPOSIÇÃO DO SISTEMA ISOLANTE MICA-RESINA

Normalmente as bobinas de estatores são submetidas a uma série de esforços elétricos e mecânicos que, associados a outros fatores como umidade e temperatura elevadas, podem acelerar a degradação da isolamento.

Como citado anteriormente, a isolamento de bobinas é composta basicamente de fitas de tecido de vidro ou outro material sintético, servindo de suporte para a mica, e impregnadas com resinas, envolvendo os condutores de cobre.

Normalmente os isolantes elétricos são classificados termicamente, sendo que esta classificação indica a temperatura máxima de trabalho suportada pelo equipamento.

As máquinas do estudo em questão, segundo especificação técnicas do fabricante, são classificadas termicamente como sendo de classe "F", classe esta que suportaria trabalhar até um limite de temperatura de 155 °C, determinada pela norma brasileira NBR 7034.

Esta mesma norma define classe "F" como *classe de temperatura que compreende materiais ou combinações dos mesmos, tais como mica, fibra de vidro, amianto, etc., com aglutinante, impregnante ou revestimentos adequados.*

A decomposição de materiais isolantes a base de resina sintética é muito complexa, e depende de vários fatores, tais como temperatura de trabalho, presença de umidade, presença de descargas elétricas ou coronas.

Dentre os mecanismos típicos de decomposição de isolantes, comentamos alguns responsáveis pela degradação térmica, citados na NBR 7278, que compreendem:

- Polimerização molecular contínua, que de início pode aumentar a resistência física e elétrica, mas pode a seguir, provocar uma diminuição da flexibilidade, fragilização e falha sob efeito de tensão mecânica;
- Oxidação, que provoca a reticulação molecular do material e sua fragilização;
- Decomposição química dos constituintes, com formação de produtos nocivos como, por exemplo, ácido clorídrico.

A decomposição térmica do impregnante é sempre um fator importante na avaliação da degradação da resina. A partir de uma simples degradação térmica podem surgir complicadores maiores, como a presença de vazios na isolamento propiciando o aparecimento de descargas parciais, descargas estas que abrem caminho através da isolamento de mica permitindo a passagem de arco elétrico e provocando a falha do equipamento.

4.0 AVALIAÇÃO PRELIMINAR DAS BOBINAS ENVOLVIDAS NA FALHA

A decomposição do meio isolante das bobinas pode ser observada visualmente pela aparência amarelada e pela presença de pó também amarelo, entre as camadas de mica, fazendo-as se soltarem com facilidade.

Vale ressaltar que nas bobinas estudadas observaram-se partes nas quais o estado do isolante estava em melhores condições do que em outras. Isto pode significar que a temperatura não é homogênea em toda a bobina, podendo-se ter uma deterioração mais severa somente em alguns pontos da isolamento.

Esta diferença, ou heterogeneidade da isolamento, dificulta uma avaliação mais precisa, pois não se sabe quais são os pontos submetidos a maiores temperaturas.

O trabalho de laboratório objetivou justamente explicar o porquê da heterogeneidade, e se a degradação da isolamento foi provocada por temperatura excessiva ou outro fator.

5.0 AVALIAÇÃO DO ESTADO DAS BOBINAS EM LABORATÓRIO

Amostras das bobinas foram levadas para ensaios em laboratório para avaliação do estado em que se encontravam. Também foram tomadas amostras de bobinas novas para comparação.

Como não se tinha parâmetros e valores de ensaios obtidos em fábrica para avaliação, tornou-se necessário adotar como metodologia a pura e simples comparação do desempenho entre amostras de bobinas novas e usadas, principalmente na avaliação feita através de ensaios elétricos.

5.1 - Ensaios de caracterização da isolamento

5.1.1. Dissecação de um segmento de bobina envolvida na falha

Em uma das bobinas envolvidas na falha, observamos um escurecimento do composto mica-resina, sendo que este ainda apresentou uma quantidade de substância em forma de pó de coloração amarelada que poderia indicar uma deterioração química do meio isolante, ou uma deterioração térmica devido ao gran-

de aquecimento dos condutores nas proximidades da falha.

Nas proximidades do cobre a resina apresentava-se com uma coloração bem escura, aparentando-se calcinada por influência da temperatura. As folhas de mica apresentavam-se totalmente sem aderência com o condutor e ainda totalmente delaminadas podendo ser separadas uma das outras sem o auxílio de ferramentas.

5.1.2. Dissecção de um segmento de bobina nova

Neste ensaio, procurou-se visualizar diferenças significativas entre as amostras. Para a realização deste, preparou-se as amostras, seccionando as barras do estator em camadas até se alcançar o condutor de cobre.

Observou-se que na bobina nova, as camadas de mica e resina apresentavam-se claras sem sinal de deterioração aparente.

Após um exame mais detalhado, pudemos observar que a resina não apresentava uniformidade na impregnação da bobina, deixando espaços vazios, onde era possível separar as camadas de mica sem muito esforço.

Através de um ensaio de percussão pôde-se confirmar a falta de compactação das camadas de mica e a deficiência no processo de impregnação, deixando vazios na isolamento.

5.1.3. Caracterização do impregnante e suporte

Para determinarmos exatamente os componentes construtivos do sistema isolante das bobinas, foram retirados vários segmentos da isolamento, e os constituintes separados manualmente, e identificados através da análise por espectrofotometria de infravermelho (FTIR), conforme Tabela 1, abaixo.

TABELA 1 – Caracterização dos materiais da isolamento

Constituinte	Material	Polímero
1	Resina impregnação	Poliéster aromático
2	Suporte da mica	Poliéster aromático
3	Verniz vermelho	Poliéster alifático
4	Verniz cinza	Poliéster alifático

Os resultados obtidos pela análise, já eram esperados, isto por que a resina de poliéster foi uma das primeiras resinas sintéticas a serem utilizadas amplamente no setor elétrico para bobinamento de motores e geradores elétricos.

5.1.4. Ensaio de teor de voláteis

Este ensaio visa determinar a quantidade de material impregnante e a variação do teor entre as amostras analisadas, quando submetidas a calcinação em forno a 700°C em atmosfera de oxigênio.

Na Tabela 2 temos os resultados deste ensaio.

TABELA 2 – Ensaio de teor de voláteis a 700°C

Amostras	Teor de Voláteis (%)
Bobina Nova – Amostra 1	33
Bobina Nova – Amostra 2	36
Bobina Usada - Amostra 1	35
Bobina Usada - Amostra 2	30
Bobina Usada - Amostra 3- Próximo ao Cobre	34
Bobina Usada - Amostra 4 – Parte interna	37
Bobina Usada - Amostra 5 – Parte interna	35

Neste ensaio observamos que a variação da quantidade de resina nas diversas amostras da bobina usada variou de 30% a 37% (valores médios) em relação a massa total da amostra.

5.1.5. Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica foi realizada em amostras de bobinas nova, usada e também em um segmento de bobina envolvida na falha.

Nesta análise verifica-se a perda de massa do sistema isolante em condições especiais de elevação de temperatura e em atmosfera inerte, ocasionada pelo rompimento das cadeias poliméricas da resina.

O gráfico abaixo mostra uma análise termogravimétrica típica do material isolante das bobinas.

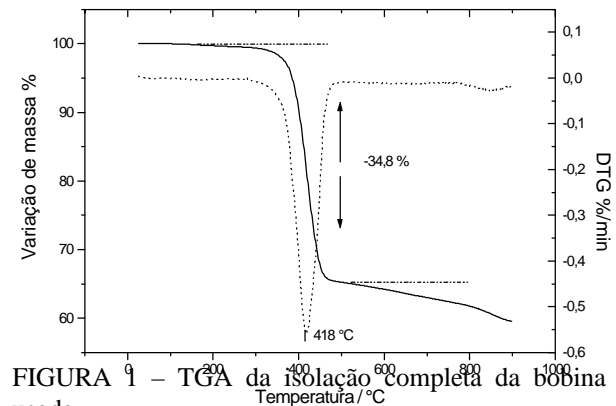


FIGURA 1 – TGA da isolamento completa da bobina usada .

A curva com traço contínuo indica a perda de massa em porcentagem durante o processo de aquecimento, e a curva tracejada a sua derivada primeira.

TABELA 3 – Porcentagens das perdas de massa no ensaio de termogravimetria

Amostra	Temp. Início °C	Temp. Central °C	Perda Massa % a 500°C	Perda Massa % a 900°C
Bobina Nova	377	422	29,7	35,7
Bobina Usada	387	418	34,8	40,5
Bobina falha	385	424	48,6	54,2

Os resultados obtidos nesta análise demonstram uma grande variação entre as amostras em relação à perda de massa, conforme os resultados apresentados na tabela 3.

5.1.6 – Calorimetria diferencial de varredura - DSC

Este ensaio é utilizado para se determinar algumas propriedades importantes da resina aplicada como impregnante das bobinas. Através do ensaio de DSC determinamos a temperatura de transição vítrea (T_g), e também a temperatura de fusão do polímero (T_m).

O gráfico abaixo demonstra uma análise de DSC de amostras de bobinas usada e nova (sobressalente).

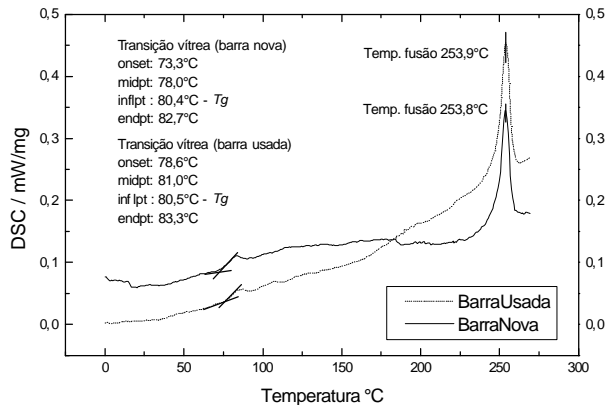


FIGURA 2 - DSC da isolação das bobinas nova e usada.

A temperatura de transição vítrea, é a temperatura a partir da qual o polímero passa de um estado rígido para um flexível. Prosseguindo com o aquecimento, temos a fusão onde o polímero torna-se fluido.

As duas amostras apresentaram temperatura de transição vítrea em torno de 80°C, e fusão em 254°C.

A determinação do valor de T_g da resina curada é extremamente necessário quando o polímero em questão é utilizado para adesão ou coesão. Se o valor de T_g é ultrapassada em operação, a resistência a tração e ou resistência a compressão do polímero é drasticamente reduzida, existindo a possibilidade de falha da isolação e, conseqüentemente, do isolamento. (Conferir Bolon).

5.2. Ensaio elétrico

Foram realizados ensaios elétricos em 03 bobinas estatóricas, sendo 01 sem uso, retirada do estoque de sobressalentes, e 02 com 19 anos de uso, retiradas da máquina sob estudo, que foram cortadas em segmentos de aproximadamente 1200mm. Esses segmentos foram identificados da seguinte maneira:

- Segmentos retirados da bobina sobressalente: 1A e 2A;

- Segmentos retirados de bobina usada da máquina: 1B e 2B;
- Segmentos retirados da bobina usada envolvida na falha: 1C e 2C.

Os seguimentos das bobinas foram submetidos a um total de 09 ciclos térmicos, sendo 03 ciclos térmicos a temperatura de 100°C, seguidos de 03 ciclos a 125°C e a ainda outros 03 ciclos a 150°C, com o objetivo de simular uma curva de tendência de envelhecimento precoce nas bobinas. Foram realizados os seguintes ensaios elétricos antes e após ciclos térmicos:

- Resistência de isolamento;
- Fator de dissipação;
- Medição de Capacitância;
- Níveis de descargas parciais;
- *Voltage endurance*

São descritos em seguida os resultados encontrados nos ensaios.

5.2.1. Resistência de Isolamento

Todos os resultados dos ensaios de resistência de isolamento, em todos os segmentos, antes e após ciclos térmicos, apresentaram valores bastante elevados, acima de 100.000 MΩ.

Foi observado, no entanto, que a bobina nova apresentou valores de resistência de isolamento menores do que as bobinas usadas, embora a bobina nova tenha apresentado índices de polarização maiores do que as usadas. Índices de polarização menores nas usadas poderiam estar associados a uma degradação da isolação destas.

A resistência de isolamento menor na bobina nova em relação a usada poderia estar associado a menor quantidade de umidade em sua isolação em relação às novas, o que poderia ser explicado pelo fato de a bobina estar em uso, que era assim, mantida sempre aquecida, ao contrario da sobressalente, que com o passar dos anos pode ter sido contaminada por umidade.

5.2.2. Fator de Dissipação

Tanto os resultados dos ensaios realizados antes dos ciclos térmicos quanto os realizados posteriormente aos ciclos, conforme Figuras 3 e 4, indicaram perdas dielétricas maiores na bobina nova do que nas bobinas usadas até tensões de ensaio na faixa de 7 kV a 9 kV, ocorrendo nesta faixa de valores uma inversão nas curvas, ou seja, as bobinas usadas passam a apresentar maiores perdas dielétricas do que a nova.

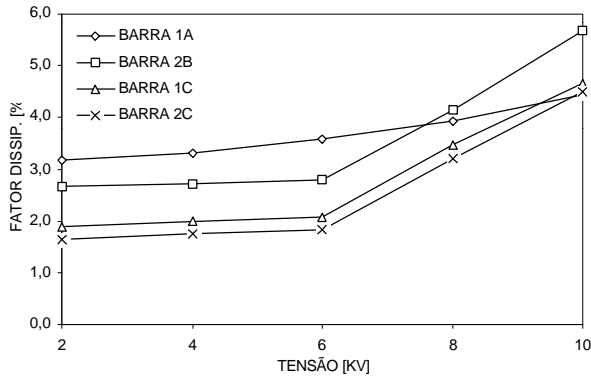


FIGURA 3 - Fator de dissipação antes ciclos térmicos.

Tal ocorrência poderia novamente apontar na direção de contaminação por umidade na bobina nova e de degradação da isolamento das bobinas usadas.

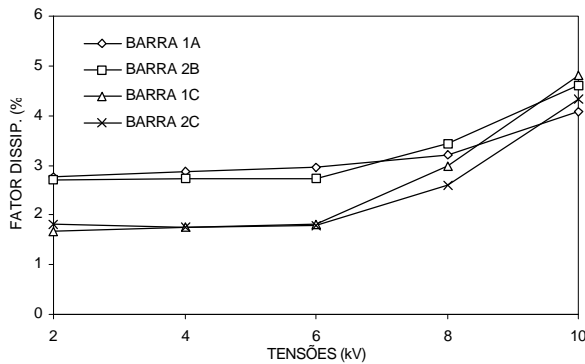


FIGURA 4 - Fator de dissipação após ciclos térmicos.

Assim, com tensões menores, as perdas decorrentes da possível presença de umidade na bobina nova estaria em evidência. No entanto, com o aumento da tensão de ensaio, a degradação da isolamento das bobinas usadas, implicando aumento de descargas parciais, começaria a ser mais significativa ficando agora ela em evidência.

Tanto deve ser assim, que observando-se a Figura 3, que mostra o FD antes dos ciclos térmicos, nota-se que a inclinação da curva da bobina nova praticamente não muda de 2 a 10 kV, enquanto que as das bobinas usadas sofrem um aumento de inclinação a partir de 6 kV. No entanto, na Figura 4, que mostra FD após ciclos térmicos, já se nota também aumento na inclinação da curva da bobina nova a partir de 6 kV, uma vez que a mesma sofreu envelhecimento após ciclos térmicos, isto é, degradação da isolamento.

Vale ressaltar que os valores de FD da bobina nova sofreram sensível redução no decorrer dos ciclos térmicos, o que se explica por perda de umidade.

5.2.3. Capacitâncias

Os valores medidos das capacitâncias da bobina nova sofreram decaimento com o decorrer da aplicação dos ciclos térmicos, sugerindo degradação da

isolamento, conforme se pode observar na Figura 5, com tendência da curva de capacitância da bobina nova em decair para as curvas de capacitância das bobinas usadas.

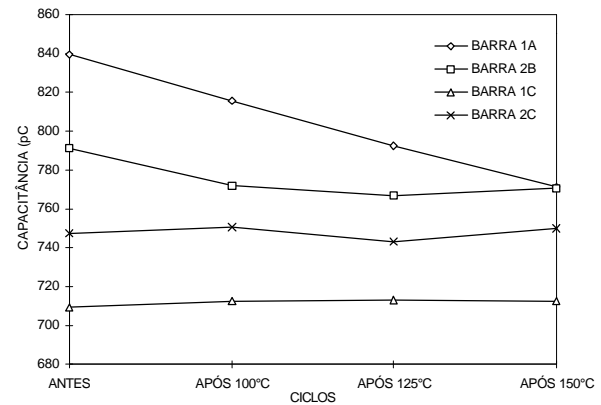


FIGURA 5- Capacitâncias em todos os ciclos à 10 kV.

5.2.4. Descargas Parciais

Pode-se observar pelas Figura 6 e 7 que as descargas parciais apresentam valores relativamente mais elevados a partir de 6 kV.

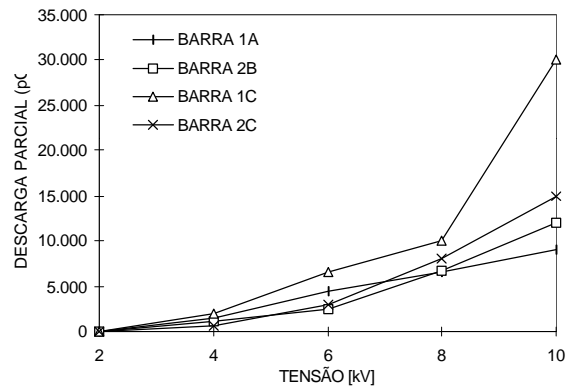


FIGURA 6 - Descargas parciais antes ciclos térmicos.

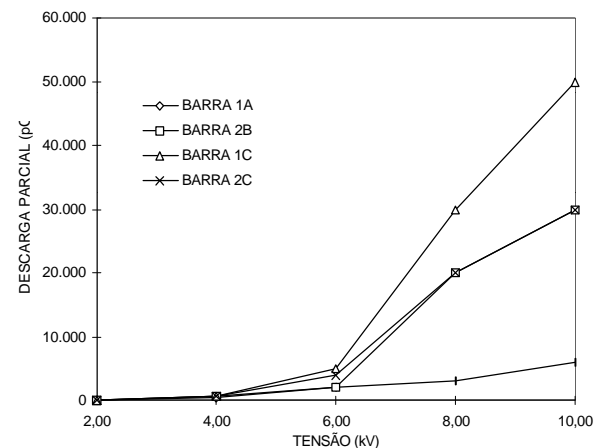


FIGURA 7 - Descargas parciais após ciclos térmicos.

Nota-se que os valores medidos de descargas parciais foram muito elevados, o que está diretamente associado ao fato de a isolação encontrar-se delaminada e com vazios (vacúolos), sugerindo que o isolamento da bobina esteja sendo garantido principalmente pela grande espessura da isolação, apesar de falhas detectadas no processo de confecção da bobina.

5.2.5. Voltage Endurance

Os ensaios de *Voltage Endurance* foram realizados em dois dos segmentos de bobinas usadas, com aplicação de 35 kV a 100°C até que ocorresse perfuração da isolação, com os seguintes resultados:

- O segmento 1B suportou 223 horas;
- O segmento 2C suportou 271 horas.

Os resultados dos ensaios atingiram valores bastante próximos dos recomendados para bobinas novas, a saber, maiores ou iguais a 250 horas.

Estes resultados vêm confirmar o que havia sido dito anteriormente, ou seja, que apesar de falhas no processo de confecção da bobina, apesar de se encontrarem delaminadas e com vazios, implicando descargas parciais elevadas, a grande espessura da isolação está garantido o isolamento da bobina.

6. CONCLUSÃO

Com base nos ensaios realizados e pelo que foi apresentado anteriormente, podemos concluir que:

- As bobinas possuem deficiências na impregnação da resina, propiciando a presença de grande quantidade de vazios;
- A resina de poliéster utilizada como impregnante possui temperatura de transição vítrea (T_g) com valor muito baixo para a temperatura de operação normal da máquina, não atendendo às exigências da classe térmica "F";
- Os resultados elétricos sugerem sistema de isolação delaminada, com presença de vazios, implicando descargas parciais elevadas.
- Devido a grande espessura e robustez de sua camada de mica, a isolação se encontra em condições de uso, haja visto o bom desempenho da mesma no ensaio de *voltage endurance* realizado nas duas bobinas usadas.

7. BIBLIOGRAFIA

(01) YOSHIDA, H.; UMEMOTO, K; Insulation Diagnosis of Rotating Machine Insulation, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-21 N°6, Dezembro de 1986, pag. 1021-1025;

(02) INOUE, Y.; YOSHIDA, H.; Test Method of Rotating Machine, IEEE Transactions on Electrical In-

sulation Vol. EI-21 N°6, Dezembro de 1986, pag. 1069-1071;

(03) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais Isolantes Elétricos – Guia para Determinação das Propriedades de Resistência Térmica, Índices de Temperatura e Perfis de Resistência Térmica, NBR-7278, Abril de 1982;

(04) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Guia para Determinação das Propriedades de Resistência Térmica de Materiais Isolantes Elétricos, Lista dos Materiais e dos Ensaio Recomendados, NBR-7572, Novembro de 1982;

(05) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação das Propriedades de Durabilidade Térmica para Materiais Isolantes Elétricos por Métodos Estatísticos, NBR-9521, Setembro de 1986;

(06) MARQUES, A.P.; SÁ, A.L.C.R de; Relatório de Ensaio Realizados em Amostras de Espiras de Hidrogerador, Celg, Agosto de 1995;

(07) PIAZZA, F.; CARON, L.E.; NACHVALGER, E. E.; Relatório nº1.726/95, LAC, Copel, Novembro de 1995.

(08) BOLON, D.A.; Epoxy Chemistry for Electrical Insulation, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, N°4, Julho/Agosto de 1995.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

André Pereira Marques, nasceu em 1961 em Araguari - MG. Graduado em Engenharia Elétrica pela UFG em 1.984. É engenheiro sênior da CELG, desde 1.984 atuando na área de Manutenção de Subestações, trabalhando atualmente na área de Engenharia de Manutenção. É professor da Escola Técnica Federal de Goiás desde 1.990, nas disciplinas Máquinas Elétricas e Ensaio, Sistemas Elétricos e Subestações.

André Luiz C. R. de Sá, nasceu em 1962 em Lins – SP. Graduado em Ciências Químicas pela UNIMEP em 1987. Trabalhou na CPFL, nas áreas de Manutenção e na Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento, na Transformadores União S.A., na Divisão de Laboratórios da CELG, foi professor nas disciplinas Tecnologia do Petróleo e Química Analítica no ETECAP e Faculdade Objetivo, atualmente diretor e responsável técnico pela ACS - Consultoria e Serviços Ltda.
e-mail: acs@persogo.com.br