



GRUPO I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA – (GGH)

**AValiação DE BARRAS E BOBINAS ESTATÓRICAS PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS E DE
GERAÇÃO ELÉTRICA**

Márcio Antônio Sens

CEPEL

RESUMO

A qualidade de barras e bobinas estatóricas para máquinas girantes de alta tensão pode e deve ser avaliada antes da colocação destas em serviço. As técnicas atuais de construção têm evoluído, mas diferem entre fabricantes e ainda são susceptíveis de falhas. Por outro lado, as técnicas de avaliação também têm evoluído e se tornado mais seletivas e sensíveis, capazes de detectar pequenas falhas, antes de levarem o sistema de isolamento ao colapso.

O **CEPEL** tem sido contratado por fabricantes e usuários para a avaliação de barras e bobinas estatóricas e acumula experiência de mais de vinte anos nestas atividades.

PALAVRAS-CHAVE

Geradores; Barras; Bobinas; Isolamento; Ensaio; Características; Avaliação.

1 INTRODUÇÃO

Uma falha de uma máquina girante para alta tensão em serviço pode custar, diretamente, mais de mil vezes o custo de uma avaliação criteriosa para a seleção e qualificação de amostras de barramentos ou de bobinas estatóricas mais resistentes e mais confiáveis. E este custo é insignificante perto dos custos indiretos de um colapso, pela paralisação e transtornos envolvidos no reparo e na recolocação do equipamento em operação, pois uma simples perfuração do isolamento elétrico de apenas um destes elementos, entre os milhares que constituem o estator destas máquinas girantes, pode implicar considerável prejuízo.

Esta avaliação dos enrolamentos estatóricos de máquinas girantes, entretanto, não deve ser decidida na última hora, já no instante da instalação, mas os ensaios devem ser programados com antecedência e as especificações técnicas definidas, em cooperação e concordância com o fabricante e/ou entidade especializada.

O **CEPEL** tem colaborado na avaliação de bobinas e barramentos estatóricos para máquinas rotativas de alta tensão, incluindo de unidades hidrogeradoras, turbogeradoras e de compensação de reativo, e também de alguns empreendimentos de repotencialização de máquinas, mas em alguns casos, infelizmente, foi chamado a colaborar apenas na análise pericial de falhas, após o colapso do equipamento.

Este trabalho mostra as principais técnicas adotadas internacionalmente para a avaliação de barras e bobinas estatóricas, e também quão boas estas podem ser fabricadas.

**2 BARRAMENTOS E BOBINAS
ESTATÓRICAS**

A forma física básica dos barramentos e bobinas para máquinas girantes de alta tensão diferem muito pouco entre os fabricantes, sendo em geral constituídas pelas formas mostradas na Figura 1, e de outra forma, na Figura 2. A Figura 3 mostra a configuração de uma bobina, típica, de um motor síncrono.

Netas mesmas figuras podem ser observadas as respectivas seções transversais das barras, com a formação dos condutores internos, em barras retangulares de cobre, isoladas entre si.

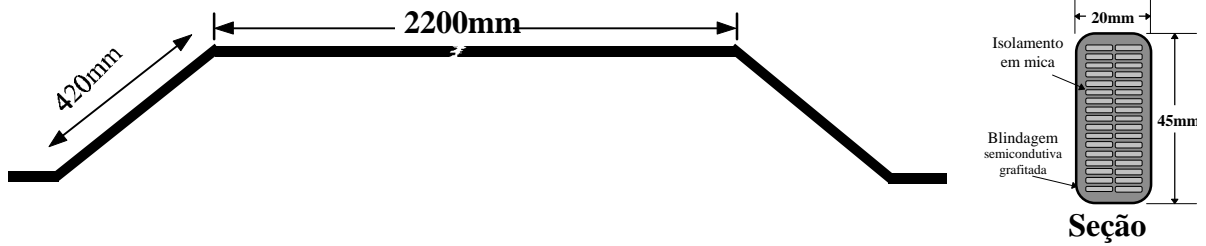


FIGURA 1 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM BARRAMENTO ESTATÓRICO TÍPICO PARA HIDROGERADOR DA CLASSE 15kV - MODELO A

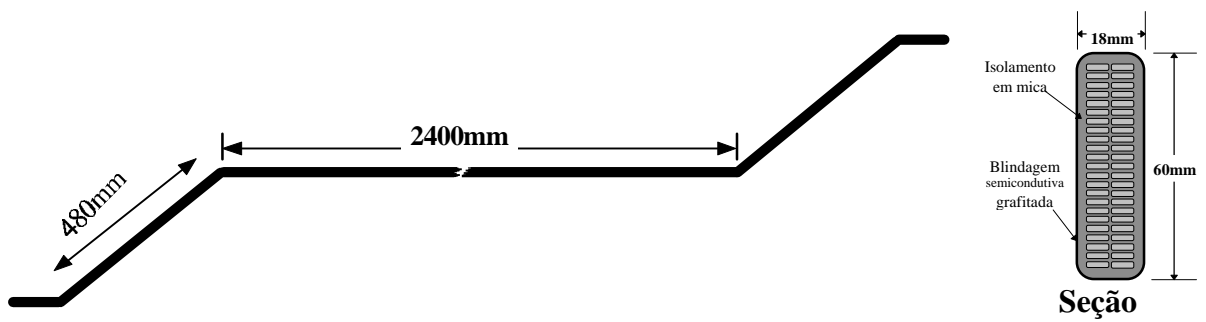


FIGURA 2 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE OUTRO BARRAMENTO ESTATÓRICO TÍPICO PARA HIDROGERADOR. - MODELO B

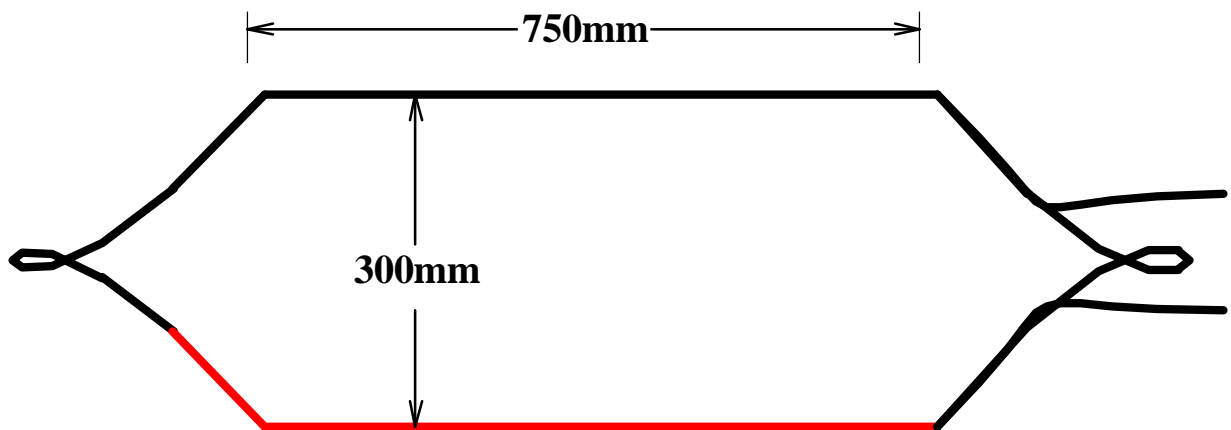


FIGURA 3 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA BOBINA TÍPICA DE MOTOR SÍNCRONO.

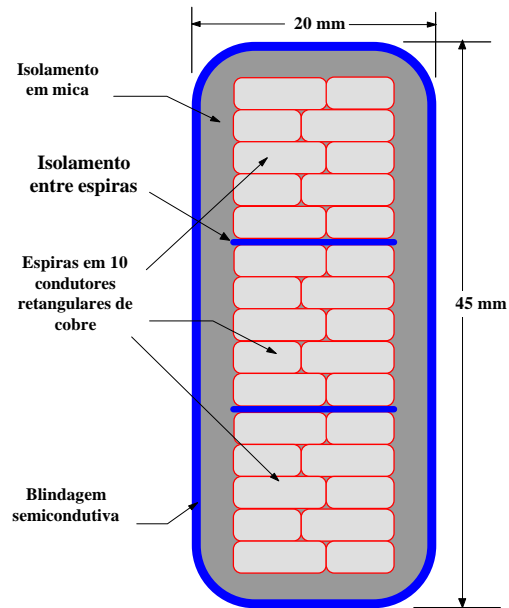


FIGURA 4 - FORMA TÍPICA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UMA BOBINA

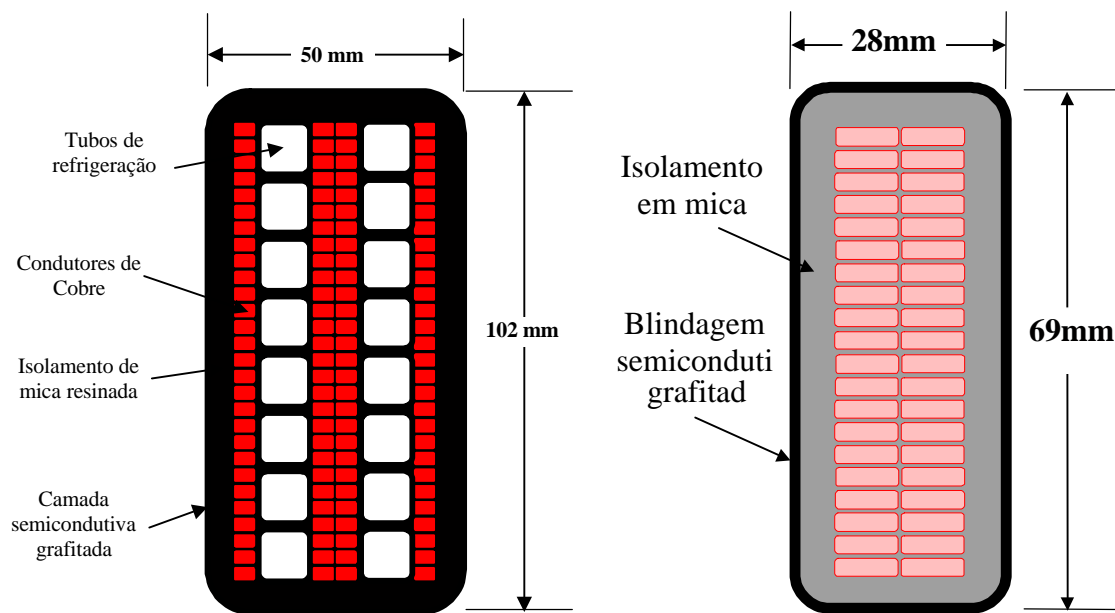


FIGURA 5 - FORMAS TÍPICAS DA SEÇÃO TRANSVERSAL DAS BARRAS OU BARRAMENTOS

A seção e o número de condutores varia levemente entre os fabricantes, conforme mostrado na Figura 4 e na Figura 5, para uma mesma capacidade de corrente, mas o que difere grandemente é o sistema de isolamento e as técnicas industriais de preparação. Os materiais dielétricos, quase sempre são constituídos

por mica, fibra-de-vidro, resinas sintéticas e elastômeros de silicone.

As barras e bobinas são especificadas para uma classe de temperatura, como F(155 °C), e para uma classe de tensão nominal da máquina, V_n e uma tensão nominal fase-terra, V_o .

3 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO

O interessado deve especificar sua lista de requisitos e exigências técnicas para as barras ou bobinas, antes da compra, ou antes de substituir o enrolamento antigo. Estas especificações variam, mas geralmente incluem a maioria ou alguns dos ensaios seguintes, onde são mostrados valores típicos encontrados, sendo aqueles em **negritos** os preferidos^{[13], [10], [11], [12]}.

3.1 Análise dimensional;

3.2 Análise de percussão acústica;

Esta análise consiste na identificação de possíveis regiões de delaminação no corpo da amostra, efetuada através de impacto mecânico e de resposta sonora, utilizando-se instrumento percussor e sensores acústicos.

3.3 Medição da Indutância da Bobina;

A indutância é uma característica física de cada bobina, que depende de sua característica geométrica e, para uma série de amostras, espera-se encontrar valores de indutâncias semelhantes. Discrepâncias elevadas nesta característica indicariam possíveis deformações ou curto-circuito entre espiras.

Entretanto, para que falhas possam ser detectadas, estas medições devem ser efetuadas com correntes de excitação elevadas, e sob elevadas frequências. O CEPEL tem utilizado, normalmente, a frequência de 30kHz e a corrente de 5A para tais medições.

Associada à medição de indutância, está sempre a do fator de qualidade, que é dependente da resistência elétrica equivalente do circuito da bobina, que inclui: os condutores da bobina; os terminais; os metais adjacentes; e os contatos elétricos.

Valores típicos para o fator de qualidade das bobinas foram encontrados entre **65** e **95**.

3.4 Resistividade elétrica da blindagem;

Este ensaio tem a finalidade de analisar a capacidade condutiva do sistema de blindagem semicondutiva das barras e bobinas, que serve de coletora das correntes capacitivas e das correntes de fuga. Para estas medições, as barras e bobinas devem ser preparadas com eletrodos auxiliares, constituídos por malhas de cobre estanhado, de pelo menos 100mm de extensão na parte central, distanciados de um perímetro da seção transversal. Para delimitação mais precisa do espaçamento, pode ser utilizado fitas adesivas condutores, metálicas, nas extremidades dos eletrodos de medição.

A resistência elétrica pode ser determinada em 1 kHz, através de analisador de indutância de precisão, com tensão de um a cinco volts, tomando-se o cuidado para conectar o condutor central da barra, ou bobina, como eletrodo de guarda, para que apenas as correntes superficiais sejam medidas.

Estas medições podem também ser efetuadas em corrente contínua, mas em geral, nesta ocorrem maiores instabilidade nas leituras, considerando a existência de materiais de base grafitica. Valores entre **0,5** e **12kΩ** têm sido encontrados.

3.5 Tensão aplicada, para detecção de falhas no sistema dielétrico;

Antes de qualquer ensaio sob alta tensão, as amostras devem ser avaliadas quanto à sua suportabilidade a tais tensões, como ensaio preliminar, com a finalidade de detectar alguma possível falha no isolamento elétrico das barras ou bobinas, numa tensão bem superior à tensão nominal prevista para operação, sob frequência de 60 Hz, na temperatura de 23 °C.

Estes ensaios, além de possibilitar uma avaliação prévia da qualidade das amostras, também serve para a segurança da instrumentação utilizada nos ensaios subsequentes, mais sensíveis. Assim, uma possível falha grosseira nas amostras já seria identificada e evitaria possíveis danos aos instrumentos de medição, além disso, se pouparia tempo, considerando que o ensaio de tensão aplicada é um dos mais rápidos de toda a série.

Para estes ensaios, as amostras devem ser preparadas com eletrodos auxiliares sobre a blindagem semicondutiva da parte reta, através de malhas de cobre estanhado, com trespasse de 40 a 50 %.

A malha de cobre estanhado, na forma como utilizada no CEPEL, para a conexão de aterramento e para a coleta das correntes de fuga, na forma de cadaço, alojada sobre a camada semicondutiva da amostra, é mostrada de forma esquemática na **Figura 6**.

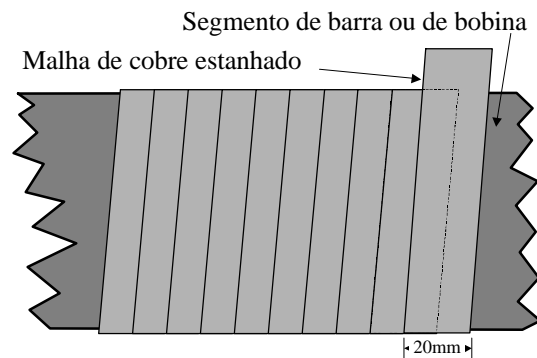


FIGURA 6 – ELETRODO AUXILIAR

Na aplicação da tensão, de um modo geral, tem sido adotada a taxa de crescimento de 1kV por segundo e a permanência no nível por um ou dois minutos. O Nível máximo da tensão a ser aplicada, em 60Hz, entretanto, depende de acordo entre o fabricante e o interessado. O CEPEL tem ensaiado barras e bobinas com a aplicação de até 380 % da tensão nominal fase-terra máxima prevista para a operação, ou seja, 3,8V_o.

3.6 Descarga parcial, para detecção de falhas incipientes;

O nível de descargas parciais identifica o estado do sistema de isolamento elétrico das amostras, no que se refere à concentrações de campo elétrico, regiões com delaminação, impurezas ou cavidades gasosas no meio dielétrico.

Este ensaio de DP's deve ser efetuado com a finalidade de detectar alguma possível amostra com falhas incipientes na isolação sob a blindagem da parte reta.

Os ensaios devem ser conduzidos conforme procedimentos da NBR 6940, ou ASTM [2], com aplicação de tensão em degraus de 20 % da tensão nominal da máquina(0,2V_n), até 1,2V_n, aproximadamente, na freqüência de 60 Hz, sob temperatura ambiente de 23 °C. Valores típicos de descargas parciais, na tensão nominal de operação, têm sido encontrados entre 200 e 20000pC^[8].

3.7 Resistência de isolamento da barra completa ou segmento de bobina;

Estas medições geralmente são efetuadas em 1000 V_{cc} e servem como identificação de sinais de muita umidade na amostra, que poderiam provocar alguma alteração das características da isolação. Valores típicos são encontrados entre 2 e 600GΩ^[14].

3.8 Corona visual nas terminações;

As amostras devem ser submetidas a uma análise de corona visual, em suas terminações, com o objetivo de identificar possíveis pontos de falha nas extremidades das barras, nas partes curvas, provocadas pelo processo de fabricação ou por possíveis danos no transporte e manuseio. A tensão máxima para estes ensaios têm sido de 3,8V_o.

3.9 Detecção de descargas parciais por meios acústicos;

Após os ensaios de corona visual, as amostras devem ser submetidas a uma análise de descargas parciais por meios acústicos, com o objetivo de identificar possíveis pontos de delaminação original, provocadas pelo

processo de fabricação ou por danos no transporte e/ou manuseio.

Para estes ensaios utilizam-se detectores de ruídos ultra-sônicos, com sensibilidades na faixa de 36 a 44kHz, com possibilidades de detecção à distância e também em contato direto com a amostra sob ensaio, através da blindagem metálica.

3.10 Capacitância e fator de dissipação em alta tensão (C&D);

Estes ensaios são conduzidos conforme recomendações IEEE^[1], BS^[3], ou DIN^[4]. A capacitância pode identificar possíveis discrepâncias geométricas entre as amostras, e também variações dimensionais durante os ensaios de envelhecimento. Valores típicos para o fator de dissipação, na tensão de operação, foram entre 0,4 a 3,5 %.

3.11 Tip-Up para o fator de dissipação;

O "Tip-Up" é uma forma de avaliação da evolução do fator de dissipação com a tensão aplicada, descrita nos procedimentos normativos^[1], ^[3], ^[4], consistindo na metade da diferença entre o fator de dissipação obtido na tensão de 60 % do valor nominal da máquina e aquele obtido na tensão de 20 % da tensão nominal.

Mas a definição do Tip-Up difere entre as recomendações técnicas européias e americanas, sendo para as primeiras^{[3][4]}:

$$Tip - Up = \frac{[D_{0,6V_n} - D_{0,2V_n}]}{2},$$

Enquanto para a recomendação americana^[1], a definição seria:

$$Tip - Up = D_{0,6V_n} - D_{0,2V_n}.$$

Embora numa diferença de fator 2, os valores encontrados para o Tip-Up variam na faixa de 50 a 5000 ppm.

Também foram encontrados casos com Tip-Up negativos, dependendo do tipo de terminação das amostras, mas estes resultados representam falhas na técnica de medição experimental^[14].

3.12 Ciclos térmicos com DP's e C&D;

Em alguns casos, ensaios de ciclagem térmica na faixa de 40 a 150 °C por hora têm sido requisitados, com acompanhamento das DP's e C&D, além da técnica seguinte.

3.13 Variação dimensional;

Normalmente esta característica é acompanhada durante os ensaios de ciclos térmicos, ou de envelhecimento acelerado sob tensão e temperatura da classe, para identificação de possíveis delaminações no isolamento micáceo, aglutinados por resinas. Os ensaios podem ser efetuados através de micrômetro digital ou pela capacitância, numa mesma temperatura, sendo que o primeiro já identifica o local com alguma anomalia, mas a segunda abrange a amostra por completo, além de ser mais sensível, podendo identificar variações da ordem de partes por milhão.

3.14 Envelhecimento, sob temperatura e tensão aplicada;

Estes ensaios são aplicados conforme IEEE^[7], sob temperaturas de 100 a 155 °C e sob tensões de 2 a 3,8V₀^{[6], [9]}. As amostras têm suportado estas condições por 3 a 2100 horas.

3.15 Autópsia das amostras perfuradas;

3.16 Teor de cinzas do dielétrico.

4 CONCLUSÕES

Considerando as normas e recomendações técnicas atuais, relativas ao assunto, e descritas nas referências, observa-se que nelas estão contidas descrições das técnicas experimentais básicas, para a avaliação do isolamento das barras e bobinas para alta tensão. Observa-se, entretanto, que nenhuma norma sequer menciona especificações, limites ou níveis para as características técnicas recomendadas para serem avaliadas. Com isto, os usuários ficam na dependência de conhecimentos nem sempre disponíveis, e de acordos com os fabricantes, com interesses e vantagens nem sempre bem balanceados entre as partes.

Conforme verificado através das investigações experimentais realizadas, a resistência elétrica superficial da camada semicondutiva externa pode ser inferior 2 kΩ, e o fator de dissipação das amostras pode ser atendido facilmente pelos bons fabricantes em limites inferiores a D= 1%, em 60 Hz, na tensão de operação, e nesta tensão, o nível de descargas parciais pode ser inferior a 500 pC.

A variação do fator de dissipação com a tensão, definida pelo Tip-Up, pode ser facilmente obtido com o limite máximo de 200 ppm, quando determinado conforme norma européia, e a resistência à tensão aplicada, na temperatura da classe de isolamento, pode ser por 480 horas, sob 380% da tensão nominal fase-terra.

5 REFERÊNCIAS

- [1] ANSI/IEEE Std 286-1975 - "IEEE Recommended Practice for Measurement of Power-Factor Tip-Up of Rotating Machinery Stator Coil Insulation", USA, aprovada em 27/01/1984.
- [2] ASTM D-1868-"Detection and Measurement of Partial Discharge (corona) Pulses in Evaluation of Insulation Systems".
- [3] BS 4999, part 61 - "British Standard Specification for General Requirements for Rotating electrical Machines - Test of the insulation of bars and coils of high voltage machines, UK, 1977.
- [4] DIN VDE 0530 Tel 1/11.72 App.10,&33 - "Rotating Electrical Machines, Germany.
- [5] Gupta, B. K. ad Culbert, I. M. - "Assessment of insulation condition in rotating machine stators", IEEE Trans. on Energy Conv., vol 7 n. 3, pg. 500, sept. 1992.
- [6] Hoffer, Michael R. "Ludington Pumped Storage Technical Specification Generator-Motor Stator Winding, USA 29/01/1998.
- [7] IEEE Std 1043-1989 - "IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils", USA, December 1989.
- [8] McDermid, W., and Bromley, J. C. - "Relationship between partial discharge pulse height analysis and subsequent voltage endurance of stator bars and coils", IEEE Trans. on Energy Conv., vol 7 n. 4, pg. 721, dec. 1992.
- [9] Meyer, Hartmut and Wichmann, Arnold S. M., Experience and Practice with Standardized acceptance test procedures for winding Machinery", CH 1952 -1983 IEEE, USA, pp. 146-151.
- [10] Sens, Márcio A. e Luiz Roberto de Almeida Rodrigues, Relatório Técnico CEPEL 555/98 – "Avaliação dielétrica de barramentos estatóricos para 20kV - Siemens", 115 pág., de 13/08/1998.
- [11] Sens, Márcio A.; Geraldo Reinicke e Luiz R. de A. Rodrigues, Relatório Técnico CEPEL 123/97, - "Avaliação das Características dielétricas de barras de hidrogeradores de 13,8kV – ELETRONORTE", Brasil, 111 pág., de 28/01/1997.
- [12] Sens, Márcio A.; Geraldo Reinicke e Luiz R. de A. Rodrigues, Relatório Técnico CEPEL 477/96, "Avaliação das Características dielétricas de bobinas de máquina síncronas de 6,6kV – LIGHT", 65 páginas, de 18/07/1996.
- [13] Sens, Márcio A.; Ueti, Edson e Mury, A. Guilherme, Relatório Técnico CEPEL 161/89 -"Características dielétricas e físicas de barras de gerador elétrico - FURNAS", Brasil, 177pág., 5/5/1989.
- [14] Train, David and Mella, Lawrence - A new Power Factor and power factor tip-up measurement technique for stator bars and coils" Doble Engineering Company Conference on Rotating Machinery, USA, 1994.

