



## Grupo de Estudo de Geração Térmica-GGT

### Curto Circuito para Terra no Enrolamento Rotórico de um Turbogenerador de 131 MW - Lições Aprendidas

**ANDRE SCHONARDIE PASQUAL(1); BRUNO GOUDINHO(1); FERNANDA OLIVEIRA(1);  
EBE(1);**

#### RESUMO

O referente artigo descreve a ocorrência notória do curto para massa no enrolamento rotórico do turbogerador de 131MW da unidade 6 do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, Capivari de Baixo – SC.

O objetivo é apresentar de forma cronológica todos os acontecimentos decorrentes do curto circuito como: dificuldades na contratação em emergência para execução de serviços de manutenção corretiva de grande porte em turbogeradores; extensão dos danos causados pelo curto circuito, sendo necessário a desmontagem do rotor e das capas de contenção do gerador; análise da causa raiz da falha a terra; procedimentos adotados durante o reparo do enrolamento rotórico; ensaios elétricos e mecânicos aplicados durante os reparos, bem como a realização de um balanceamento em baixa rotação do rotor do gerador.

#### PALAVRAS-CHAVE

Turbogeradores, Curto Circuito para massa, Enrolamento Rotórico, Manutenção Corretiva.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

O referente curto circuito a terra ocorreu durante o retorno operacional da unidade vinda de uma parada de máquina para manutenção. O gerador estava realizando testes no regulador de tensão e durante o teste de atuação do limitador de máxima corrente rotórica ou limitador de máximo aquecimento do rotor, com o gerador sobreexcitado, quando ocorreu a atuação da proteção 64F – Falha Terra no Rotor.

Após constatado o curto circuito no enrolamento rotórico por meio de ensaios elétricos de resistência de isolamento, iniciou-se a desmontagem do rotor do gerador. O rotor do gerador teve as suas capas de contenção removidas e iniciada as inspeções e ensaios elétricos para constatação da localização e dos danos causados pelo curto circuito. Serão demonstrados no artigo todos os aspectos encontrados que necessitaram de manutenções corretivas, bem como quais procedimentos foram adotadas nas mesmas.

#### 2.0 - CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA

TABELA 1 – Dados de placa do Gerador

Fabricante	SKODA
Tipo	H640844/2HH
Potência Nominal	131 MW
Tensão Nominal	13800 V
Corrente Nominal	6540 Amperes
Fator de Potência Nominal	0.8
Tipo de Refrigeração	Hidrogênio
Rotação Nominal	3600 rpm
Classe de Isolamento	“F”
Tensão de Excitação	375 V
Corrente de Excitação	1400 Amperes

#### 3.0 - SEQUENCIAL DE TRABALHOS

### 3.1 Ensaio de recepção no enrolamento dos pólos

Realizado o ensaio de resistência de isolamento nos enrolamentos dos pólos do rotor e obteve-se o seguinte resultado, para uma tensão de 500 Vcc durante 1 minuto,  $1,87k\Omega - 3Vcc$ . Este resultado evidencia que o enrolamento rotórico se encontra em curto circuito para a massa.



FIGURA 1 – Vista Geral do Rotor

### 3.2 Limpeza geral do corpo do rotor e capas de contenção para inspeção e ensaios não destrutivos (LP e US)

Foi realizada a limpeza das capas de contenção das cabeças de bobinas. Esta limpeza contou com a remoção do verniz e com a preparação das capas para realização dos ensaios mecânicos.



FIGURA 2 – Ensaio de Líquido Penetrante



FIGURA 3 – Ensaio de Ultrassom

### 3.3 Ensaio mecânicos não destrutivos (LP) no acoplamento antes da desmontagem

Antes da desmontagem do acoplamento foi realizado um ensaio de LP na região dos furos do acoplamento para verificação da ausência de indicações.

### 3.4 Ensaio mecânicos não destrutivos (US e LP) nas capas de contenção do gerador antes da desmontagem

A fim de investigar a presença de possíveis trincas e microtrincas nas superfícies externas das capas de contenção do gerador foram realizados ensaios de Líquido Penetrante e Ultrassom nestas peças.

Os resultados de ambos os ensaios foram satisfatórios, ou seja, não foram encontradas indicações de trincas.

### 3.5 Ensaio mecânicos não-destrutivos (LP e US) nos munhões do rotor

A fim de investigar a presença de possíveis trincas e microtrincas nos munhões do rotor do gerador foram realizados ensaios de Líquido Penetrante.

Os resultados dos ensaios foram satisfatórios, ou seja, não foram encontradas indicações de trincas nos munhões.

### 3.6 Preparação e desmontagem do acoplamento

O acoplamento do rotor deve ser retirado para permitir a desmontagem da capa de contenção LA. O acoplamento é montado sobre interferência do corpo do rotor, sendo que existem três pinos (chavetas) para travar o mesmo. Um dos pinos foi retirado a frio, sendo que nos outros dois foi necessário aquecer o acoplamento para retirá-los.

O acoplamento foi aquecido a uma temperatura de 350°C para a perfeita dilatação antes da retirada do mesmo sobre o eixo. Para isto foram utilizados quatro chuveirões para que este aquecimento fosse rápido antes da temperatura se dissipar para o eixo.

Houveram apenas pequenos arranhões no eixo e no acoplamento, sendo que estes não representam riscos para o retorno operacional do rotor segundo orientações do fabricante Brush/Skoda.

### 3.7 Preparação e desmontagem dos colos dos ventiladores

Para a retirada das capas LA e LNA se torna necessário a remoção dos colos dos ventiladores que são montados também sobre interferência no eixo. Com uma temperatura de apenas 150°C, estas peças já podem ser removidas.

### 3.8 Preparação e desmontagem das capas de contenção

As capas foram aquecidas até uma temperatura de 250°C, temperatura que permite a retirada das capas dos geradores das unidades 5 e 6 da UTLB por meio da dilatação mecânica e livrando-as do ajuste sob interferência.

Antes de elevar a temperatura a 250°C é necessário que o anel trava axial da capa de contenção seja todo introduzido o interior do rasgo do eixo, para que a capa possa ser extraída livremente. Para esta ação sobre o anel trava axial é utilizado um dispositivo com parafusos.

### 3.9 Inspeção e determinação da extensão dos danos

Com as capas do rotor desmontadas foi dado início ao processo de inspeção para localização e determinação da extensão dos danos do curto circuito para massa.

Foi encontrado, na região da cabeça de bobinas no lado não acoplado, o curto circuito para massa em uma conexão dos pólos que estava completamente carbonizada, fechando o curto pela capa de contenção, levando a danos nesta.

As inspeções foram realizadas em conjunto com o fabricante Brush/Skoda e seguem abaixo:

#### 3.9.1 Mudança do projeto das conexões flexíveis entre condutor e enrolamento

No projeto original do fabricante Skoda, as conexões flexíveis que realizam a ligação entre o parafuso do tuco condutor e a primeira espira do enrolamento rotórico possuíam um formato em "J", conforme desenhos abaixo.

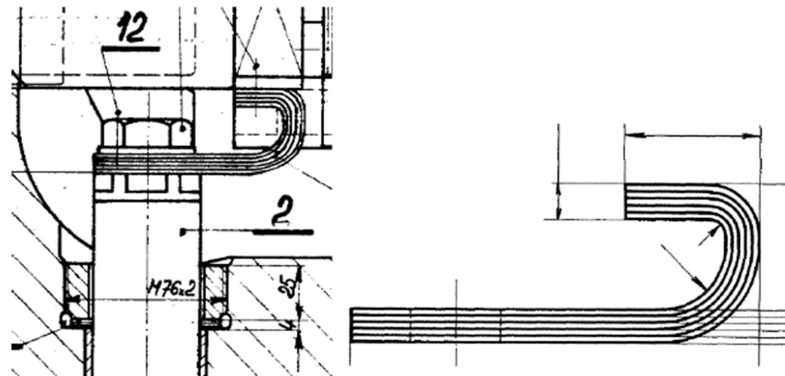


FIGURA 4 – Ligação Flexível original entre tubo condutor e enrolamento rotórico

Durante o reisolamento em 2005, estas ligações flexíveis foram substituídas com um formato diferente não respeitando o dimensional original e usual para vários fabricantes.

O resultado foi a quebra de várias lamelas de cobre no polo 1 e polo 2.

#### 3.9.2 Qualidade da solda executada nas conexões elétricas do enrolamento de campo

A qualidade das soldas das conexões elétricas no LNA foi insatisfatória, sendo que foram encontradas soldas quebradas na conexão dos pólos e a outra conexão dos pólos foi encontrada sublimada gerando um curto circuito para a terra (Janeiro de 2016).

Possibilidade da utilização de uma solda prata inadequada, ou procedimento de solda inadequado.

A provável sequência dos fatos discutidas entre peritos da seguradora/Skoda-Brush/Tractebel foi:

- 1) Quebra da solda de uma das ligações dos pólos;
- 2) Conseqüentemente a segunda ligação dos pólos ficou sobrecarregada assumindo toda a corrente de campo do gerador;
- 3) Originou-se um sobreaquecimento até a sublimação da conexão;
- 4) Carbonização e conseqüente falha para a terra no enrolamento rotórico.



FIGURA 5 – Conexão entre os polos trincada



FIGURA 6 – Localização do curto para massa

### 3.9.3 Mudança de projeto das cunhas do rotor

Segundo o fabricante do gerador, a interferência da capa de contenção deve estar distribuída por toda a circunferência da capa e do corpo do rotor.

A interferência da capa está se dando apenas no forjado do eixo do rotor, em virtude das cunhas terminais do rotor terem sido usinadas para um dimensional menor que o eixo.

Esta foi uma mudança de projeto em relação ao original e segundo relatório do fabricante é de extrema preocupação.

### 3.9.4 Reutilização dos calços das cabeças de bobinas com dimensionais inadequados e consequente movimentação de espiras

Segundo o fabricante do gerador, no momento de uma reisolação, se torna necessária a fabricação de novos calços para os dimensionais corretos das cabeças de bobina. Isto porque na modelagem das bobinas, quando se reutiliza o mesmo cobre do enrolamento, os dimensionais originais dificilmente retornam para a mesma condição, demandando novos calços que realizem o devido travamento e permitindo a correta dilatação e trabalho das cabeças de bobinas.

Em virtude da utilização de um calçamento inadequado, ocorreram movimentações inadequadas de espiras e bobinas.

### 3.9.5 Mudança dos dimensionais de projeto das cabeças de bobina do enrolamento rotórico

Segundo o fabricante do gerador, os dimensionais finais das cabeças de bobinas estão fora dos limites aceitáveis. A nova capa de contenção possui os dimensionais originais do fabricante Skoda, na região de interferência e cabeças de bobinas, porém com um sistema de travamento axial diferente do projeto original.

Com isso, os controles dimensionais indicaram a utilização de uma cama isolante inferior do que o projeto original, que era em torno de 8mm, sendo que a cama montada em 2005 foi em torno de 6mm. Isto porque os dimensionais da capa na região interna que fazem contato com as cabeças de bobinas estão conforme medidas originais, porém, as cabeças de bobinas estão fora dos limites aceitáveis.

Segundo o fabricante, estas cabeças de bobinas estão com uma demasiada liberdade para movimentação, que somada a um incorreto calçamento proporcionou deformações ao longo do enrolamento rotórico, bem como a quebra de calços nas cabeças de bobinas e quebra das conexões elétricas.

### 3.9.6 Desprendimento da isolação entre espiras nas cabeças de bobinas

Várias isolações (Nomex) na região de curvatura das cabeças de bobinas estão completamente soltas. Provável uso de material (cola) incorreto para aplicação ou procedimento de aplicação inadequado.

## 3.10 Sequencial de ações corretivas para normalizar o rotor

### 3.10.1 Inspeções e reparo nas capas de contenção

A capa de contenção LA não apresentou quaisquer indicativos nos ensaios não destrutivos realizados tanto nas regiões interna como externas: LP fluorescente e Ultrassom.

Já na capa LNA, na região do curto circuito foram encontradas indicações superficiais nos ensaios de LP fluorescente e nada foi observado no ensaio de ultrassom. Foi realizado o processo de desbaste mecânico por meio de ferramenta rotativa (pedra e lixa) para remoção destas indicações. Foi removido em torno de 1,5mm de material localizadamente. Ao repetir os ensaios não destrutivos não foram encontradas indicações.



Adicionalmente foi contratado o Cepel para realização de ensaios de dureza nas capas de contenção (na região do curto) para verificação do aquecimento localizado nesta região do aço pudesse ter causado uma mudança na estrutura do mesmo. Os resultados apresentados pelo Cepel mostraram que a capa estava em estado satisfatório, sendo apto seu retorno operacional.

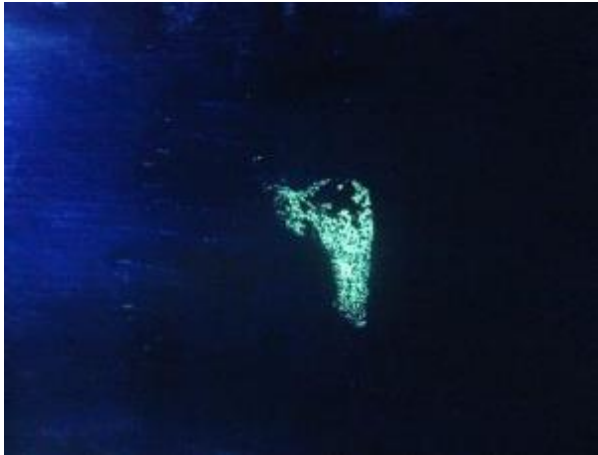


FIGURA 7 – indicações na Região do Curto Circuito



FIGURA 8 – Região após desbaste mecânico

### 3.10.2 Inspeções e reparo nas conexões flexíveis

Foram substituídas as lamelas de cobre oriundas do isolamento em 2005. As novas conexões flexíveis foram normalizadas conforme projeto/desenho original Skoda, fornecido pelo fabricante do gerador. Ao todo são 5 lamelas de 1,6mm de espessura, com banho de prata na conexão do parafuso do tubo condutor.



FIGURA 9 – Conexão Flexível polo 1



FIGURA 10 – Conexão Flexível polo 2

### 3.10.3 Inspeções e reparo das espiras danificadas das sétimas bobinas do polo 1 e polo 2

Em função do curto circuito para massa, ocorreu a sublimação da conexão dos pólos. Com isto, a 14ª e a 15ª espira dos pólos 1 e 2 ficaram extremamente danificadas, não mais sendo possível seu uso.

Foi necessário retirar em torno de 70% das cunhas das 7 bobinas de ambos os pólos para poder ser realizado o corte destas espiras avariadas.

O corte das espiras ocorreu na região reta e a conexão (solda) ficará localizada abaixo das cunhas, conforme orientação do fabricante Skoda/Brush. Na região das cabeças de bobinas a 15ª bobina se encerra, ou seja, é o final do enrolamento e será substituída até o seu final. Para a 14ª, a conexão solda será realizada na região após a curvatura do enrolamento, conforme orientação do fabricante Skoda/Brush.

Toda a isolamento entre espiras foi substituída na região de cabeça de bobina nas espiras 15, 14, 13 e 12. Até a 13ª espira a isolamento estava comprometida, já na 12ª a isolamento estava em estado satisfatório.



FIGURA 11 – Detalhe da região do curto circuito



FIGURA 12 – Espiras danificadas e eliminadas



FIGURA 13 – Fabricação de novas espiras do rotor

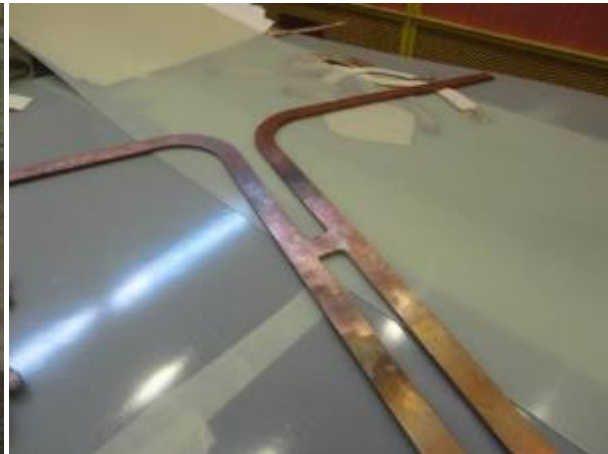


FIGURA 14 – Montagem das novas espiras



FIGURA 15 – Isolação entre espira danificada no curto



FIGURA 16 – Novas espiras e novas isolações



FIGURA 17 – Cabeça de bobina finalizada



FIGURA 18 – Cama isolante montada

### 3.11 Inspecção das cabeças de bobinas e calçamento

Ao realizar a inspecção dos calços e cabeças de bobinas, verificamos a presença de calços soltos e alguns quebrados, bem como uma contaminação generalizada por carbonização do curto circuito e óleo. Os calços foram limpos, fabricados novos conforme dimensionais originais de fábrica e recolocados em sua posição de projeto. Os mesmos foram colados por meio de resina.

Foi necessário também realizar uma recuperação da defletora de hidrogênio em função da mesma estar avariada com pinos soltos e regiões quebradas em decorrência dos esforços ocorridos nas cabeças e bobinas.

### 3.12 Ensaio elétrico realizados para avaliação do reparo e do estado do enrolamento rotórico

#### 3.12.1 Resistência de isolamento – Anel coletor positivo para massa

Conexão	Tensão do ensaio	Resistência de Isolamento – 1'	Temperatura	Unidade
Anel coletor positivo contra massa	521 Vdc	3,67 GΩ	28,7°C	60%

#### 3.12.2 Resistência de isolamento – Anel coletor negativo para massa

Conexão	Tensão do ensaio	Resistência de Isolamento – 1'	Temperatura	Unidade
Anel coletor negativo contra massa	521 Vdc	16,4 GΩ	28,7°C	60%

#### 3.12.3 Resistência de isolamento – Enrolamento rotórico para massa

Conexão	Tensão do ensaio	Resistência de Isolamento – 1'	Temperatura	Unidade
Enrolamento rotórico contra massa	521 Vdc	511 MΩ	28,7°C	60%

#### 3.12.4 Resistência de isolamento – Enrolamento rotórico completo (anéis + tubo + enrolamento)

Conexão	Tensão do ensaio	Resistência de Isolamento – 1'	Temperatura	Unidade
Rotor completo contra massa	521 Vdc	106 MΩ	28,7°C	60%

#### 3.12.5 Resistência ôhmica do enrolamento rotórico completo (anéis + tubo + enrolamento)

Conexão	Resistência ôhmica	Temperatura	Unidade
Enrolamento rotórico	251,1 mΩ	28,7°C	60%



### 3.12.6 Ensaio de curto entre espiras – Surge Test

Sem indicações de curto.

### 3.12.7 Ensaio de curto entre espiras – Queda de tensão dos pólos

Tensão injetada	Corrente injetada	Queda de tensão Polo 1	Queda de tensão Polo 2
100 V	6,5 A	50,01 C	50,5 V

### 3.12.8 Ensaio de curto entre espiras – RSO

Sem indicações de curto.

### 3.12.9 Ensaio de HIPOT

Conexão	Tensão programada	Tensão do ensaio – 1'	Corrente de fuga
Rotor completo contra massa	1200 Vdc	1200 Vdc	7 $\mu$ A

### 3.12.10 Resistência de isolamento após aplicada – Enrolamento rotórico completo (anéis + tubo + enrolamento)

Conexão	Tensão do ensaio	Resistência de Isolamento – 1'	Temperatura	Unidade
Rotor completo contra massa	521 Vdc	205 M $\Omega$	28,7°C	58%

### 3.13 Correção e re-fixação de calços deslocados da posição original entre bobinas

Todos os calços que estavam deslocados da sua posição de projeto foram recolocados na posição original. Este procedimento foi realizado usando feltros e resina epóxi com cola (mistura de 50%).

### 3.14 Preparação e montagem das capas

As capas foram aquecidas até uma temperatura de aproximadamente 350°C, e levou um tempo de aproximadamente 40 minutos de fogo para atingir esta temperatura utilizando 3 maçaricos.

Além da utilização do sistema de montagem brida/dispositivo, foram utilizados macacos hidráulicos para colocar a capa no seu devido lugar, tanto no lado LA como no LOA.

A capa foi remontada exatamente em sua posição original, conforme marcação realizada antes da desmontagem.

O anel elástico da capa do gerador permaneceu dentro do rasgo do rotor por meio do dispositivo de montagem/desmontagem, sendo que ao entrar na capa o dispositivo é arrastado para fora pela própria capa.



FIGURA 19 – Montagem da capa LA



FIGURA 20 – Montagem da capa LNA

### 3.15 Preparação e montagem dos colos dos ventiladores

Com as capas já montadas e frias foi dado início a montagem dos ventiladores, LA e LOA. Ambos os colos voltaram a sua posição original conforme marcação realizada antes da desmontagem (pulsionadas).



### 3.16 Preparação e montagem do acoplamento

O acoplamento foi aquecido até uma temperatura de aproximadamente 350°C, e levou um tempo de aproximadamente 30 minutos de fogo para atingir esta temperatura utilizando 3 maçaricos.

O acoplamento entrou sem pressão utilizando apenas a ponte rolante, sendo levado a sua posição na mão. Os pinos trava foram inseridos logo na sequência com o acoplamento ainda a quente. Os pinos entraram sem maiores dificuldades.

### 3.17 Preparação e ensaios mecânicos não destrutivos nas capas após montagem

Após as capas montadas foi dado início ao tratamento da superfície para realização dos ensaios de LP e US. Os ensaios não detectaram nenhuma presença de trincas, fadigas ou microtrincas.

### 3.18 Ensaio elétrico finais

Após o fim dos serviços previstos no cronograma de manutenção corretiva do rotor foram realizados os ensaios elétricos finais.

Foi realizado o ensaio de resistência de isolamento do rotor e obtido o valor de 680 MΩ, resultado satisfatório. Foram repetidos os ensaios de curto entre espiras, sendo que não foi encontrada nenhuma indicação de curto.

### 3.19 Balanceamento

Após todas as manutenções corretivas o rotor do gerador foi levado para uma balanceadora de baixa rotação com capacidade de suportar o peso do rotor do gerador para refino do balanceamento. Foi obtido um grau de balanceamento G1.0, e também foi verificada a ausência de curto entre espiras por meio de uma bobina pesquisadora, ou sensor de fluxo magnético durante o balanceamento dinâmico do rotor.

## 4.0 - CONCLUSÃO

É importante salientar que sinistros ocorridos em Turbogeneradores causam longos períodos de indisponibilidade forçada, e infelizmente muitos ocorrem em cenários de PLD elevados, gerando grande perdas de receitas aos seus agentes.

Como principais contribuições o artigo apresentou a causa raiz do sinistro, visando que os agentes do setor elétrico também possam evitar este tipo de falha elétrica, bem como as lições aprendidas a serem compartilhadas durante um evento de sinistro em Turbogeneradores, com vistas em otimizar a eliminação de problemas técnicos durante as Manutenções corretivas, além de auxiliar na agilidade do tempo de reparo deste equipamento, ou seja, retornar para operação comercial da forma mais rápida possível, com segurança e confiabilidade operacional.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Inventory of Main Maintenance Interventions on Turbo Generators, Working Group A1-41, 2015.
- (2) LANTHORN, G. EPRI, "Field Guide: Visual Inspection of Steam Turbine Generators" 2012.
- (3) Pasqual, A. S., Mapa de Falhas em Turbogeneradores - Inspeções Preventivas Capazes de Evitar Grandes Danos e Indisponibilidades Forçadas, ENAM 2016.
- (4) Klempner, G, Kerszenbaum, I, Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance, IEEE 2008.

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

- Nome: André Schonardie Pasqual;

- Local e ano de nascimento: Foz do Iguaçu, 02/07/1984;

- Local e ano de graduação: Foz do Iguaçu, 2006;

- Experiência profissional: Engenheiro Eletricista, formado pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, especialista em máquinas elétricas rotativas, grande experiência com rebobinagens de estatores e rotores de turbogeneradores de dois pólos, rebobinagens de grandes motores de indução, balanceamento de turbogeneradores em túnel de disparo, experiências profissionais nos principais fabricantes de turbogeneradores fora do Brasil (EUA e Europa).

