



**SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GPT 08
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS – GPT

ACIDENTE E RECUPERAÇÃO DA TURBOMÁQUINA A VAPOR 1 DA USINA TÉRMICA DE SANTA CRUZ

Evandro Freire *

Angelo Pongeggi Vargas Filho

Manoel da Costa Lucas

Paulo Roberto Madeira

Antonio Carlos Pina de Andrade

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

COUPLING LTDA.

RESUMO

A unidade geradora 1 da UTE de Santa Cruz, com cerca de 80 MW de potência, entrou em operação comercial em 1968. Em junho de 2004, a turbomáquina 1 sofreu um acidente devido a falta de lubrificação de óleo nos mancais da unidade geradora que, por sua vez, afetou muitos dos componentes da turbomáquina face ao aumento momentâneo da vibração e conseqüente roçamento de partes do estator e do rotor. Até a época do acidente, a unidade vinha operando normalmente, acumulando, até então, cerca de 88.000 horas de operação e 1656 partidas, sendo 231 a frio e 1455 a quente.

Os danos resultantes do acidente afetaram, principalmente, os seguintes componentes: mancais e munhões dos geradores e turbinas, selagens e superfícies de vedação de vapor, óleo e hidrogênio, palhetas e diafragmas da turbina de baixa pressão, pás dos ventiladores do gerador, além de introduzir batimentos no eixo do gerador, devido ao seu próprio empenamento.

O trabalho abordará o acidente e suas causas, a avaliação de integridade estrutural de componentes afetados, métodos utilizados e extensão dos danos por ensaios não-destrutivos, o desenvolvimento da especificação técnica para a recuperação da turbomáquina, medições, ensaios e aspectos tecnológicos empregados, notadamente, na recuperação por solda das palhetas da turbina de baixa pressão, soluções técnicas adotadas e, finalmente, os resultados obtidos, bem como, os custos envolvidos.

PALAVRAS-CHAVE

Turbomáquina a Vapor, Manutenção, Soldagem, Ensaios Não-Destrutivos

1.0 - INTRODUÇÃO

A UTE de Santa Cruz possui 6 unidades geradoras, sendo que as 4 primeiras foram concebidas, por projeto, para trabalharem com vapor em ciclo Rankine. Em 2005, foram agregadas à instalação mais duas turbinas de 175 MW cada, ambas a gás, mas com possibilidade de operar com óleo Diesel. Esta ampliação possibilitou que as unidades mais antigas, 1 e 2, fossem transformadas para o ciclo combinado. As unidades 3 e 4, cada uma com 200 MW, estão em operação desde 1973 e, permanecerão, ao menos por enquanto, operando em ciclo convencional a vapor. A capacidade instalada total da UTE de Santa Cruz é de 910 MW.

Face à sua localização, situada no município do Rio de Janeiro – RJ, a usina tem importância estratégica para a geração de energia no estado do Rio de Janeiro, notadamente, em anos hidrológicamente secos.

(*) Rua Real Grandeza, 219 – sala 701 - Bloco A – CEP 22283-900 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2528-4862 – Fax: (+55 21) 2528-4057 – Email: efreire@furnas.com.br

Atualmente, como os reservatórios das usinas hidrelétricas brasileiras encontram-se com a sua capacidade de acumulação próxima do limite, a usina de Santa Cruz somente tem despachado esporadicamente, permanecendo as suas unidades geradoras na quase totalidade do tempo em estado de preservação.

2.0 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS PRINCIPAIS DA TURBOMÁQUINA

2.1 Turbina

Fabricante: Westinghouse Electric Corp.

Tipo: "Tandem-Compound" com dupla exaustão, com reaquecimento e condensação.

Composição: Alta Pressão (AP) – 1 estágio Curtis e 5 Rateau

Média Pressão (IP) – 8 estágios Rateau

Baixa Pressão (BP) – 12 pares de palhetas de reação

Potência Nominal – 81,6 MW

Rotação Nominal – 3600 rpm

Pressão Inicial – 125,6 kg/cm²

Temperatura Inicial – 537,6 °C

Número de Extrações de Vapor – 5

2.2 Gerador

Fabricante: Westinghouse Electric Corp.

Tipo: Eixo horizontal, polos lisos com refrigeração a hidrogênio

Potência Aparente: 88,3 MVA

Corrente do Estator: 3695 A

Tensão do Estator: 13,8 kV/60 Hz

Fator de Potência: 0,85

Rotação Nominal: 3600 rpm

Pressão do Hidrogênio: 2,10 kg/cm²

Temperatura Máxima do Estator: 45 °C

Temperatura Máxima do Rotor: 79 °C

3.0 - O ACIDENTE E SUAS AVARIAS

Com aproximadamente 88.000 horas de operação, no dia 16 de junho de 2004, quando o turbogerador estava sincronizado, mas sem carga, a máquina foi retirada do sistema através da atuação do relé de bloqueio da unidade dando-se a sua parada em apenas 3 minutos, quando o usual seria em 30 minutos, evidenciando a falha de lubrificação. Durante o processo de parada, por problemas de transferência no barramento do serviço auxiliar, as bombas auxiliar e principal de lubrificação dos mancais não foram acionadas, no entanto, mesmo partindo apenas a bomba DC a mesma seria suficiente para lubrificar os mancais. Testes posteriores à parada mostraram, no entanto, que a sua vazão liberada não chegou a alcançar os mancais para o devido suprimento de óleo. Face à falta de lubrificação forçada, o filme de óleo dos mancais foi rompido, gerando atrito combinado e elevando o nível de vibração do rotor que, por sua, ocasionou o roçamento de várias partes do rotor com o estator da máquina.

A investigação promovida após o acidente mostrou que a falta de lubrificação deveu-se ao fato da válvula seletora do resfriador de óleo de lubrificação encontrar-se fechada, impedindo a passagem das descargas das bombas de lubrificação. O posicionamento do obturador desta válvula, na condição fechada, só foi possível graças a fratura do seu pino limitador de posição, ou seja, um batente que impediria que a válvula se fechasse. Face à elevada resistência deste pino, um pino de aço, a hipótese de uma manobra operacional errada não pode ser afastada.

Como consequência do acidente, foram avariados os seguintes componentes: queima dos mancais do gerador e das turbinas BP e IP/AP, roçamentos nos munhões do gerador e da turbina BP, empenamento do eixo do rotor do gerador, roçamento das pás e difusores dos ventiladores de hidrogênio do gerador, roçamento nos colos e danos nas selagens de hidrogênio e óleo do gerador, roçamento nos colos e danos nas selagens das turbinas BP e IP/AP e roçamento entre as palhetas de alguns estágios da turbina BP.

Até a época do acidente, a unidade geradora 1 vinha operando e sendo mantida normalmente, atendendo, sem maiores solicitações, às demandas de carga do sistema elétrico. Neste período não houve relatos de problemas de vulto anteriores ao acidente.

4.0 - ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS PARA AVALIAÇÕES DE INTEGRIDADE

4.1 Palhetas e Diafragmas da Turbina de Baixa Pressão

Estes elementos apresentaram um número elevado de avarias, com cerca de 500 palhetas e diafragmas, com sinais de roçamento em maior ou menor grau nas cabeças dos rebites de fixação dos anéis de consolidação (bandagens). Sendo que, em ao menos uma roda, todas as palhetas apresentaram roçamento. A Figura 1 mostra a ocorrência típica. As palhetas foram investigadas pelos ensaios de Partículas Magnéticas (métodos da bobina e do Yoke) nas fixações das palhetas (tipo "árvore de Natal") ao eixo do rotor da turbina de baixa pressão, de Radiografia (Gamagrafia) nas fixações das palhetas (tipo "espigas rebitadas") aos anéis segmentados de consolidação, de Ultra-Som (US) nas fixações destas palhetas aos anéis segmentados de consolidação e por Líquido Penetrante (LP) onde fosse necessário para dirimir eventuais dúvidas.

4.2 Munhões e Colos de Selagens do Rotor do Gerador

Partículas Magnéticas (método da bobina) nos 2 munhões e respectivas regiões rotativas de vedação (colarinhos) dos mancais de guia do rotor do gerador, além de LP toda vez que se julgasse necessário. A Figura 2 mostra a aplicação do método.

4.3 Anéis de Retenção do Gerador

Os anéis de retenção dos geradores 1 e 2 da usina de Santa Cruz são de material desconhecido, no entanto, sabe-se que trata-se de um aço martensítico, magnético e com dureza na faixa de 30 Rc. Estes anéis não sofreram danos em consequência do acidente, no entanto, a sua substituição por outros no material 18Mn18Cr foi fortemente recomendada pelo fabricante sob a alegação que este é mais resistente à corrosão sob-tensão, fenômeno que já levou a falha em serviço de alguns destes componentes em diversas instalações no mundo inteiro. Para avaliar seu estado, os mesmos foram inspecionados por endoscopia interna, partículas magnéticas (métodos da bobina e do Yoke) e LP.

4.4 Resultados dos Ensaios (1)

"Nenhum dos ensaios detectou qualquer tipo de indicação registrável, estando assim todas as partes inspecionadas aprovadas".

5.0 – PRINCIPAIS RECUPERAÇÕES E SERVIÇOS

5.1 Palhetas da Turbina de Baixa Pressão (BP)

Uma vez que os ensaios não-destrutivos demonstraram que estas palhetas mantinham a sua integridade estrutural após o acidente, e que os danos restringiram-se aos roçamentos nas cabeças dos rebites de sujeição dos segmentos dos anéis de consolidação (bandagens) de alguns estágios da turbina BP, foi definido na própria especificação para o reparo do turbogerador que a recuperação das palhetas deveria ser feita por solda, ao invés da substituição das palhetas por novas, conforme inicialmente pensava-se ser necessário. O dimensionamento destas cabeças de rebites, basicamente, é feito com fator de segurança 3 em relação às solicitações de cisalhamento devido ao surgimento de esforços centrífugos. Como tratava-se de um procedimento inovador no âmbito da empresa e que ainda deveria ser desenvolvido, a especificação previu a designação de um consultor de solda, responsável pela elaboração do procedimento e pela qualificação de soldagem, e de um "laboratório de metalurgia" independente que testaria os corpos de prova e submeteria seus resultados para análise, antes da aplicação do processo de soldagem no campo. Desta forma, após a caracterização metalúrgica das palhetas (ASTM A217 GrCA15), foi estabelecida, grosso modo, a seguinte diretiva: retirada das bandagens das palhetas que tiveram as cabeças dos rebites afetadas, recorte e recomposição das espigas ("tenons") com INCONEL 625 através de solda TIG com pré-aquecimento, alívio térmico de tensões após recomposição, recolocação da bandagem e rebitagem a quente. A Figura 3 mostra estas palhetas em diferentes etapas de recuperação. Nas palhetas dos 2 estágios extremos do rotor da turbina de baixa há uma chapa soldada ("erosion shield") de Stellite, cuja função é oferecer maior resistência à abrasão aos jatos de condensado nestas duas rodas. Face à temperatura de fusão da liga de prata, usada nesta solda por brasagem, ser inferior à temperatura recomendada do alívio térmico, houve necessidade de ressoldar-se estas chapas de Stellite ao final de todo o processo. O rebitamento das espigas somente foi concretizado depois desta ressoldagem. Ao final de todo o processo, as palhetas foram novamente submetidas ao ensaio não-destrutivo de radiografia.

5.2 Rotor do Gerador

Além dos danos pontuais devido ao roçamento dos munhões, selagens e ventiladores de circulação do gás de resfriamento, o eixo do rotor empenou cerca de 0,23 mm. Este empenamento foi retirado através de usinagem ocorrida em várias etapas, constando basicamente de operações em torno com posterior acabamento em retífica paralela.

A seqüência de atividades executadas durante a usinagem do rotor do gerador foi a seguinte:

- verificação de runout em todas as seções, com o rotor apoiado em roletes.

- posicionamento do rotor do gerador em torno horizontal, entre pontas, para verificação de batimentos axiais do flange e construção de superfície de referência para usinagem.
- alteração da fixação para placa e ponto, objetivando a usinagem dos diâmetros da região de selagem e posição axial dos flanges.
- posicionamento do rotor em uma retífica paralela, apoiado nas regiões de selagem para retífica dos munhões e acerto de demais seções cilíndricas. Para a retífica das regiões de selagem, o apoio foi transferido para os munhões. A usinagem de todos os raios de concordância foi realizada com rebolos previamente preparados.

Após o processo de recuperação do rotor do gerador, foram verificadas as leituras de runout nas regiões dos munhões, flanges e selagens, obtendo-se valores satisfatórios com variações máximas de 0,025mm. Os deslocamentos radiais medidos nos munhões após a usinagem e pré-balanceamento foram inferiores a 0,01mm

5.3 Mancais e Selagens

Após caracterização metalúrgica dos respectivos materiais, os mesmos foram fabricados de forma a serem mantidas as folgas de projeto a partir dos diâmetros resultantes das usinagens de munhões e colos de vedação.

5.4 Balanceamentos de Bancada e no Campo

Antes da remontagem e do acoplamento dos rotores do gerador, da turbina BP e da turbina IP/AP, os mesmos foram balanceados previamente em bancada, ainda em fábrica, para a rotação de 600 rpm. De forma geral, os valores deixados de vibração foram inferiores a 50% dos valores operacionais do conjunto girante nesta mesma rotação.

5.5 Outros Serviços

5.5.1 Carcaça externa da turbina de alta pressão: esta carcaça bi-partida tem as suas partes unidas através de parafusos prisioneiros. Uma inspeção por boroscopia demonstrou que tanto os furos roscados na carcaça, quanto os prisioneiros encontravam-se corroídos, além disto devido a uma aparente relaxação dos estojos, havia, previamente ao acidente, uma fuga externa de vapor. A solução consistiu em alargar os furos roscados e fabricar novos prisioneiros adequados para este novo diâmetro e também às elevadas temperaturas de trabalho.

5.5.2 Selagens de vapor, óleo e hidrogênio: todas as selagens afetadas foram substituídas conforme o projeto original.

6.0 – CUSTO DO REPARO

Face à decisão de não se trocar as palhetas da turbina BP afetadas no acidente por novas, mas sim repará-las por soldagem, o custo do reparo foi grandemente reduzido. Estimativas iniciais davam conta que o valor do mesmo poderia alcançar aproximadamente R\$ 14.000.000,00, que poderia ainda ser maior caso, se no escopo da recuperação fosse incluída a troca dos anéis de retenção do gerador. No entanto, a avaliação de integridade que se fez através de ensaios não-destrutivos, antes de iniciar-se o reparo propriamente dito, permitiu trazer este montante para cerca de R\$ 3.300.000,00. Esta economia basicamente foi conseguida evitando-se trocas desnecessárias.

7.0 – CONCLUSÃO

Atualmente a máquina encontra-se em início de processo de remontagem de algumas de suas partes no campo, outros serviços ainda restam para ser concluídos. Espera-se que até fins de maio de 2007 todos os componentes estejam aptos para serem remontados, possibilitando que em fins de julho a máquina possa ser reintegrada ao sistema elétrico. Face aos cuidados tomados na especificação e execução dos serviços de recuperação, há a expectativa que os mesmos sejam levados a bom termo com resultados bastante satisfatórios no que diz respeito ao funcionamento estável e suave da turbomáquina.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Relatório de Inspeção dos Componentes do Turbogenerador 1 da Usina de Santa Cruz, PND Radiografia Industrial Ltda., Fevereiro de 2005.



Figura 1 – Roçamento típico em cabeça de rebite nas palhetas da turbina BP



Figura 2 – Ensaio de Partículas Magnéticas (método da bobina) em munhão do gerador



Figura 3 – Recomposição por soldagem das cabeças dos rebites das palhetas