

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

OCORRÊNCIA NO GROOVE DA PÁ DA UG03 DA UHE TAQUARUÇU

**RICARDO LUIZ ANTONIOLLI PASSALACQUA(1); TIAGO DOS SANTOS(2); HUMBERTO DE CAMARGO
GISSONI(3)
CTG BRASIL(1); RIO PARANA ENERGIA S.A(2); VOITH HYDRO(3)**

RESUMO

Durante o serviço de recuperação cavitacional na UG03 da UHE Taquaruçu, verificou-se, através de inspeção por líquido penetrante nas pás, a presença de uma trinca na região do *groove* que após inspeção por ultrassom constatou-se que se tratava de uma trinca com 30,0 mm de comprimento e 35,5 mm de profundidade. Foi então, feito um estudo em que se levantaram várias possibilidades de reparo, mas por ser uma região de concentração de tensão, decidiu-se por evitar reparos com solda. A empresa Voith Hydro foi contratada para fazer o dimensionamento do reparo por elementos finitos, que consistiu em uma nova geometria para o *groove*, similar a dos projetos atuais.

PALAVRAS-CHAVE

1.0 INTRODUÇÃO

A UHE Taquaruçu iniciou sua operação comercial em 11/12/1992, inicialmente apenas com a Unidade Geradora 01 (UG01). A montagem de todas as cinco unidades geradoras foi finalizada em 22/01/1997. Com uma potência nominal unitária do gerador de 112 MVA, o total produzido pela usina chega a 560 MVA. A UG03, foco desta análise, iniciou sua operação comercial em 15/10/1994.

Para facilitar o entendimento e a discussão, segue na Figura 1, o corte geral das UGs da UHE Taquaruçu.

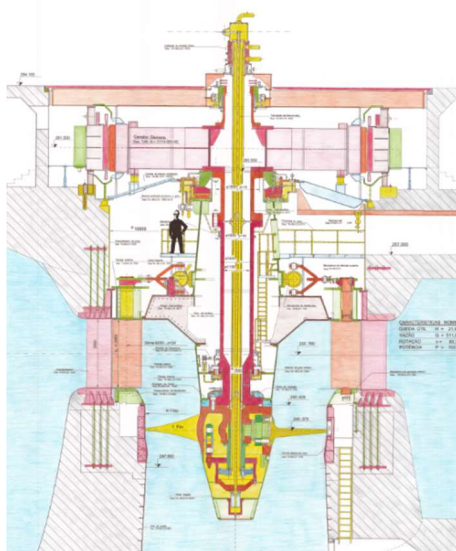


Figura1 – Corte geral da UG.

As UGs da UHE Taquaruçu contam com turbinas do tipo Kaplan com queda líquida de 21,9 metros, vazão nominal de 511 m³/s, rotação nominal de 85,71 rpm, sentido de rotação horário e diâmetro do rotor de 7.693 mm, conforme Figura 2.

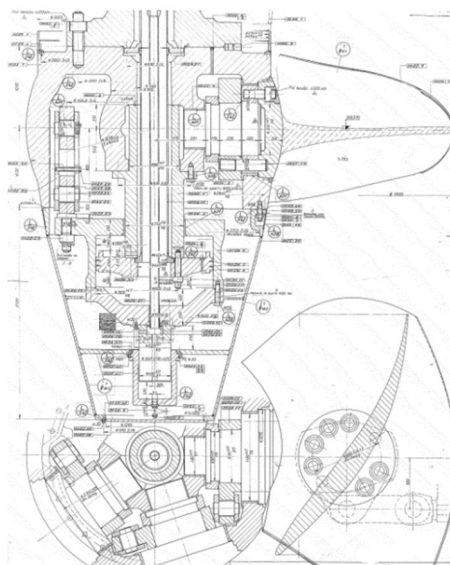


Figura 2 – Corte do rotor Kaplan da UHE Taquaruçu.

As UGs da UHE Taquaruçu apresentam um problema crônico de cavitação nas pás e na envolvente. De modo que, no máximo, a cada 60.000 horas uma recuperação cavitacional é mandatória.

As regiões cavitadas na envolvente ficam alinhadas com as posições das palhetas enquanto as regiões cavitadas nas pás se localizam na borda de saída. Durante as recuperações é comum surgirem trincas nas posições cavitadas da envolvente, enquanto no rotor é normal o aparecimento de cavidades em algumas pás.

Mesmo com os desgastes nas pás do rotor não há um aumento significativo nas oscilações dos mancais, como pode ser observado na Figura 3, onde a órbita é mostrada para 3 condições de operação diferentes, com potência de 60, 80 e 100 MW.

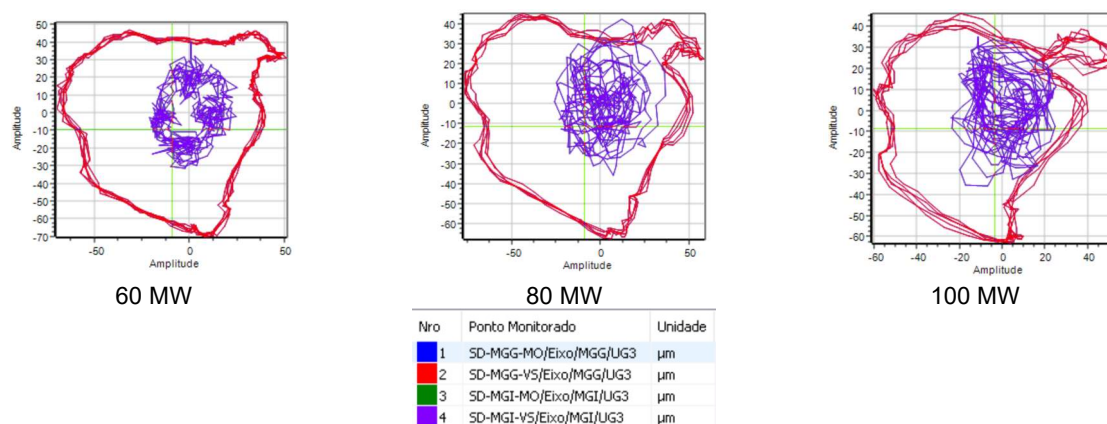


Figura 3 – Órbita dos mancais de guia do gerador e da turbina da UG03 antes da manutenção.

Os maiores valores das oscilações pico-a-pico da UG03 são 122,02 μm a 60 MW, 136,38 μm a 80 MW e 121,58 μm a 100 MW. Para todas estas condições, conforme a norma ISO 20816-5, a unidade geradora se encontra na zona A-B (excelente).

2.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Para as manutenções de grande porte, de acordo com a política da CTG Brasil, pela sua complexidade e longa duração, é definida uma equipe para fazer o acompanhamento e planejamento, sendo designados um Gestor da Manutenção, um planejador e uma equipe de técnicos capacitados para a execução deste trabalho. De modo resumido, as etapas do planejamento estão dispostas abaixo:

1. O planejamento se inicia em maio do ano anterior, com a definição do Gestor da Manutenção e o início das atividades;
2. A seguir é escolhida a equipe responsável pelo planejamento da manutenção, composta pelo Gestor da Manutenção, planejador, coordenador e técnicos especialistas da usina;

3. Antes da manutenção propriamente dita, é realizada uma inspeção para agregar qualquer outra pendência que possa surgir e evitar o aparecimento de serviços não planejados;
4. Após a realização da inspeção é emitido um relatório de inspeção;
5. Este relatório é analisado e como resultado é preparado um cronograma preliminar da manutenção;
6. O material gerado é levado à discussão com a equipe de planejamento;
7. Após a validação da documentação, é feita a primeira reunião oficial, em que são definidos os técnicos responsáveis pelas frentes de serviço e os serviços que serão contratados;
8. O passo seguinte é desenvolver as especificações técnicas para as contratações dos serviços necessários;
9. Na sequência é feita a integração das demandas da equipe de manutenção da usina com o plano de manutenção que está sendo preparado;
10. Em seguida, é feita uma manutenção preventiva nas comportas ensecadeiras de montante e jusante e equipamentos de içamento;
11. Os acompanhamentos com a equipe de suprimentos são quinzenais;
12. As empresas parceiras são convocadas para integração e envio do cronograma de mobilização;
13. 15 dias antes do início oficial da manutenção, toda a equipe se apresenta para mobilização e conferência dos materiais e preparação para o início das atividades. Também neste momento, ocorre a reunião de abertura de projeto;
14. O planejamento é considerado finalizado.

Os gestores das manutenções são engenheiros mecânicos especialistas, com vasta experiência na área e com grande conhecimento técnico, porém caso seja necessário, outros engenheiros podem ser contatados em caso de dúvidas ou problemas específicos.

Todas as usinas possuem guias de manutenção descrevendo os serviços que devem ser executados, como são executados em cada tipo de manutenção, sua periodicidade e duração planejada. Além disso, estão disponíveis protocolos padrão específicos para cada tipo de equipamento e usina.

Na eventualidade de um problema inesperado, como foi o caso desta manutenção, existe um procedimento que deve ser adotado intitulado Análise e Divulgação de Causa Raiz, composto dos itens descritos a seguir:

- Análise da causa raiz;
- 5 porquês;
- Diagrama de causa e efeito ou Ishikawa;
 - Visão geral;
 - Desenvolvimento do diagrama de causa e efeito;
- Grupo de análise de causa raiz
 - Definir a ocorrência;
 - Análise da ocorrência;
 - Definição dos modos de falha;
 - Determinar as causas físicas;
 - Determinar as causas humanas;
 - Determinar as causas latentes;
 - Desenvolver e avaliar as ações corretivas.

3.0 EXECUÇÃO

Como informado anteriormente, devido aos problemas de cavitação, as UGs da UHE Taquaruçu possuem uma limitação de operação de 60.000 horas entre manutenções de grande porte. A UG03 estava com aproximadamente 55.000 horas de operação e a manutenção foi planejada para o período entre 08/09/2019 e 13/01/2020.

Todas as etapas de planejamento foram seguidas conforme procedimento. A manutenção teve início no dia planejado com a parada da UG, colocação das comportas ensecadeiras de montante e jusante, esgotamento parcial e salvamento de peixes. Como o foco principal deste tipo de manutenção é a recuperação cavitacional, toda a equipe foi mobilizada para que este trabalho se iniciasse o mais rápido possível, logo após o salvamento de peixes, a montagem da plataforma de manutenção do rotor da turbina e andaimes para acesso ao local.

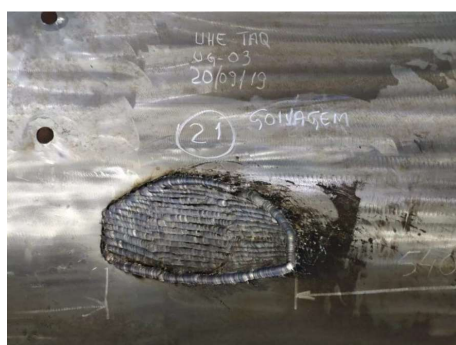
A etapa inicial consiste no mapeamento das áreas cavitadas da evolvente e do rotor Kaplan (Figura 4), na sequência é feita a goivagem e ensaio de Líquido Penetrante (LP) para identificação de trincas, como pode ser observado na Figura 5.



a. Evolvente

b. Pá do rotor Kaplan

Figura 4 – Mapeamento da cavitação na evolvente e pás do rotor Kaplan.



a. Goivagem. b. Ensaio de LP.

Nas etapas subsequentes é realizada a aplicação do material por solda e acabamento (esmerilhamento) como pode ser observado na Figura 6.



a. Aplicação de solda. b. Acabamento.

Figura 6 – Aplicação de solda e acabamento.

Na sequência, é feita a recuperação das cavitações nas pás do rotor Kaplan, seguindo os mesmos procedimentos da evolvente, goivagem, ensaio de LP, aplicação de solda e acabamento, como pode ser observado na Figura 7.





Figura 7 – Recuperação da cavitação nas pás do rotor Kaplan.

Após a realização da recuperação cavitacional, foram feitas inspeções nas regiões típicas de concentração de tensão das pás, região do *groove*, onde foi identificada uma trinca na pá número 03 no lado de pressão, com comprimento de 30,0 mm e profundidade de 35,5 mm, conforme inspeções por líquido penetrante e ultrassom. Ver Figura 8.



Figura 8 – Trinca na pá número 03.

Com a identificação de um problema inesperado, foi dado início ao procedimento de Análise e Divulgação da Causa Raiz, com as execuções preliminares de identificação da causa raiz, execução dos 5 porquês e diagrama causa e efeito. Nesta etapa foram feitos os seguintes questionamentos/ ações:

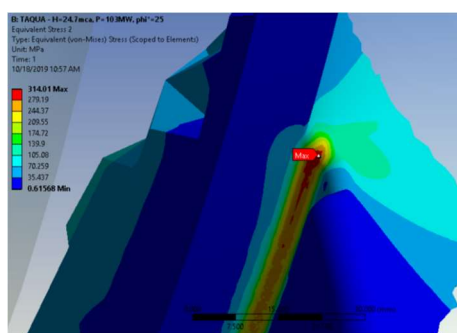
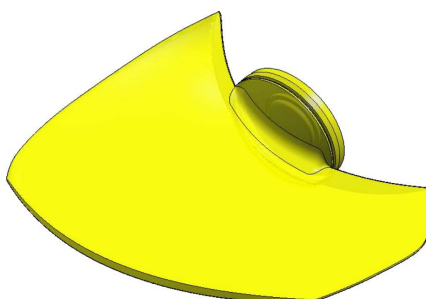
- Primeiras dúvidas: a recuperação é realmente necessária? Esta trinca é crítica?
 - Os relatórios das últimas manutenções desta UG foram analisados e não havia qualquer evidência de trinca naquele local;
 - O histórico das outras UGs da usina de Taquaruçu foi levantado e apenas uma trinca foi identificada na pá número 01 da UG02, porém não foram encontradas evidências da recuperação;
 - Nas UHs Jurumirim e Jupia também foram identificadas evidências de trincas nas pás que foram tratadas conforme abaixo:
 - Na UHE Jurumirim, que é uma turbina Kaplan de menores proporções, foi identificada uma trinca na face de pressão e outra trinca próxima à região do *groove*, ambas as trincas foram recuperadas;
 - Na UHE Jupia, que se trata de uma turbina Kaplan de dimensões similares às da UHE Taquaruçu, a trinca não foi identificada a tempo e houve o rompimento de parte da pá, que teve que ser substituída;
 - Com base nas análises acima, a conclusão foi que a trinca era crítica e alguma ação de recuperação deveria ser tomada;
- Foi criado o Grupo de Estudos, formado por engenheiros especialistas da CTG Brasil, técnicos especialistas da usina e da delegação chinesa:
 - A equipe chinesa compartilhou uma ocorrência similar em uma usina na China, em que a trinca foi recuperada;
 - Abaixo os resultados do grupo de estudos:
 - A CTG tem experiência para tratar ocorrências desta forma, como pode ser comprovado com o exemplo da recuperação na UHE Jurumirim;

- Comparando-se os projetos percebe-se que na pá da UHE Jupia existe uma região do *groove*, enquanto na UHE Taquaruçu este *groove* praticamente não existe, eliminando este fator de redução da concentração de tensão;
- O resultado principal do grupo de estudos foi que um *groove* deveria ser implementado na pá da UHE Taquaruçu, porém ainda não estava claro se isto seria possível e nem o formato a ser adotado;
- Para fazer estas definições foi contratada a empresa Voith Hydro, que além de importante parceiro, tem a experiência necessária e foi o fornecedor original da turbina;
- Uma outra consideração importante é que o serviço precisaria ser feito em campo, sem a necessidade de desmontagem e sem impactar o prazo da manutenção.

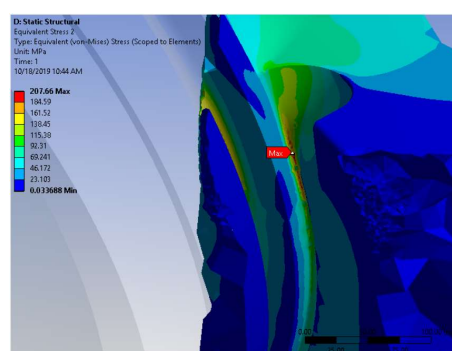
Como resultado, foi proposta a introdução de um raio de alívio com a finalidade de eliminar a trinca e reduzir a concentração de tensão no local. A Voith Hydro ficou responsável pela realização dos cálculos, utilizando um *software* de elementos finitos, e apresentação das possíveis soluções. O resultado deste cálculo para a condição original e a solução proposta, pode ser observado na Figura 9.

Rotação	n	=	85,7	rpm
Potência	P	=	103	MW
Vazão	Q	=	450	m ³ /s
Nível de montante	HWL	=	284	manm
Nível de jusante	TWL	=	258,7	manm
Queda bruta	Hg	=	25,3	m
Perda de carga	ΔH	=	0,6	m
Queda líquida	Hnet	=	24,7	m
Ângulo de abertura das palhetas	$\Delta \gamma$	=	42	°
Ângulo de abertura das pás	$\Delta \phi$	=	25	°
Empuxo Hidráulico ¹⁾	Fs	=	7300	kN

¹⁾ Conforme ensaio de modelo



a. Distribuição de tensão na condição original.



b. Distribuição de tensão na condição de geometria alterada.

Figura 9 – Comparação da distribuição de tensões da geometria original e com a alteração.

Com a alteração, houve uma redução da concentração de tensão de 35% em relação à condição original. As dimensões da geometria calculada aparecem na Figura 10.

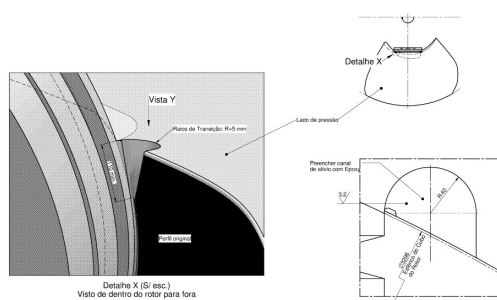


Figura 10 – Geometria da região de concentração de tensão.

Após esta definição, foi criado o procedimento abaixo:

1. Fazer uma furação com broca de $\phi 5,0$ mm de diâmetro na extremidade da trinca para evitar a propagação (Figura 11.a);
2. Marcar as dimensões indicadas na Figura 10, na face do local onde será feita a remoção do material (Figura 11.b);
3. Remover o material com lima rotativa (Figura 11.c);
4. A cada 10 mm de profundidade e após a remoção da face da trinca inicial, deve-se repetir a inspeção por líquido penetrante e ultrassom (Figura 11.d);
5. Após a completa remoção da trinca, fazer polimento da região (Figura 11.e e f);
6. Finalização do serviço.



a. Furação na extremidade da trinca.



b. Geometria para remoção da trinca.



c. Remoção do material com lima rotativa.



d. Líquido penetrante após a finalização dos trabalhos.



e. Realização do acabamento.



f. Após acabamento.

Figura 11 – Recuperação da trinca na pá 03 do rotor Kaplan.

Após a finalização do serviço, para a completa eliminação da trinca, o material foi removido até uma profundidade de 78,0 mm, largura de 43,0 mm e comprimento de 62,0 mm. Durante a remoção do material, foi encontrado um poro, que foi identificado como a origem da trinca.

4.0 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi descrever o procedimento para recuperação de uma trinca na região de concentração de tensão (*groove*) na pá Kaplan número 03 da UG03 na UHE Taquaruçu, além disso foi apresentado todo o processo decisório e de recuperação cavitacional empregado na usina com o intuito de mostrar a sequência normal do serviço.

A trinca na pá do rotor Kaplan foi identificada após a finalização das tarefas de recuperação cavitacional, durante as inspeções normais de finalização dos trabalhos, e mesmo com as atividades adicionais de reparo, o prazo de retorno da máquina ao sistema foi mantido.

O objetivo da CTG foi atingido, realizando a manutenção preventiva dentro do prazo previsto, mesmo com esta alteração no escopo. A Voith Hydro foi parte fundamental neste sucesso, realizando todo o cálculo e propondo a solução do perfil do *groove* de forma simples e que atendeu as necessidades de campo.

A trinca foi totalmente removida, e com a redução da concentração de tensão de 35% apresentada nos cálculos, a UG deve operar com segurança até a próxima manutenção. Este procedimento pode ser implementado em qualquer tipo de pá Kaplan com trinca nesta região desde que avaliado pelo fabricante do equipamento.

DADOS BIOGRÁFICOS



Engenheiro Mecânico com Graduação pela Unesp campus de Ilha Solteira e Mestrado em Engenharia Mecânica pela Unicamp. Possui 14 anos de experiência na área de energia, sendo 10 anos como especialista em dimensionamento de geradores e turbinas e coordenação técnica de projetos de hidrogeradores em projetos como nas UHEs Jirau, Santo Antonio, Belo Monte, entre outras e nos últimos 4 anos como gestor de projetos de manutenção e modernização de hidrogeradores na CTG Brasil.

(2) **TIAGO DOS SANTOS**
Graduado em Engenharia Mecânica pela Faculdade Politécnica de Jundiaí - FPJ, Especializado em Método dos Elementos Finitos (MEF) pela ESSS. Já atuou como Engenheiro Projetista em Turbinas e Gerente de Projetos em grandes fornecedores de equipamentos para Usinas Hidrelétricas. Atualmente, atua como Coordenador de Engenharia Mecânica na CTG Brasil nas atividades de manutenção e modernização das 14 UHEs da companhia.

(3) **HUMBERTO DE CAMARGO GISSONI**
Mestre e doutor pela Escola Politécnica de São Paulo com estudos na área de vibração induzida pelo escoamento. 24 anos de experiência no setor hidrelétrico com passagens pelos departamentos de oferta, engenharia e gerenciamento de projetos nas unidades da Voith Hydro no Brasil, Estados Unidos e Áustria. É atualmente gerente da engenharia do produto, responsável pelo projeto de turbinas, geradores e equipamentos hidromecânicos.