



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GGH/08

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - 01

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

DIFICULDADES VS OPORTUNIDADES - CASO DE SOLUÇÃO PARA PROBLEMA DE RSI E CAVITAÇÃO NO LADO DE PRESSÃO DE ROTOR FRANCIS, ASSOCIADOS A GANHO DE ENERGIA

**Richard A. Straatmann (*)
Sven von Fellenberg**

ANDRITZ HYDRO S.A.

**Alexandre P. Ferretti
Leonir J. Cibulski
Fernando L. Hain
ENGIE BRASIL ENERGIA**

RESUMO

Todo investimento em tecnologia e projeto de turbinas é um processo de melhoria contínua, e cada execução é única com suas particularidades e riscos inerentes ao mesmo. Desta forma ocorre, ainda que raramente, necessidades de melhoria identificadas no protótipo.

A UHE de Ponte de Pedra foi objeto de problemas e importantes melhorias relacionadas à *RSI (Rotor Stator Interaction – Interação entre Rotor e Estator)*, erosão por cavitação atípica no lado de pressão das pás do rotor da turbina, juntamente com aumento do rendimento que foi oportunizado na ocasião.

PALAVRAS-CHAVE

Turbina Francis, cavitação, *RSI (Rotor Stator Interaction – Interação entre Rotor e Estator)*, rendimento, otimização

1.0 - INTRODUÇÃO

O fornecimento de turbinas hidráulicas é resultado de um trabalho multidisciplinar, complexo, sendo objeto de contínuas otimizações e desenvolvimentos a cada projeto, seja turbina nova, reforma ou repotenciação, que naturalmente possui particularidades em diversos aspectos.

Desta forma podemos abstrair, sem exageros, que cada projeto é único, por vezes tendo a fase de otimização e desenvolvimento, em parte, estendida até o período de geração, resultado de inúmeras melhorias aplicadas em primeira mão.

Destacamos da turbina da UHE Ponte de Pedra otimizações desenvolvidas e implementadas no protótipo, decorrentes de um retorno de experiência de um projeto semelhante, e de cavitação excessiva que ocorreu inclusive no lado de pressão das pás do rotor.

1.1 Aspectos gerais da usina

A Usina Hidrelétrica Ponte de Pedra foi dimensionada para uma potência instalada de 176,1 MW obtida através de três unidades geradoras de 58,7 MW (61,80 MVA com F.P. = 0,95) cada uma, acionados por turbinas hidráulicas do tipo Francis de eixo vertical com potência máxima de saída de 60,0 MW. Situa-se no rio Correntes, divisa entre os estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, no Brasil, nas coordenadas 17° 36' 31" de latitude Sul e 54° 49' 40" de longitude Oeste. A concessão para produção e comercialização de energia elétrica, de 1999, determinava a garantia física de 131,6 MWh/h e potência assegurada de 163,1 MW. Em 2008, a Engie Brasil Energia (originalmente Tractebel Energia) fez a aquisição da empresa Ponte de Pedra Energética S.A., responsável pela usina desde a concessão, incorporando-a aos seus ativos de geração a partir desta data.

2.0 - PROBLEMAS E SOLUÇÕES

2.1 Excitações dinâmicas – RSI

No início da montagem das unidades geradoras, outro projeto Francis com características semelhantes teve sérios problemas de trinca nas pás do rotor da turbina – veja Figura 1. Após intensas investigações e estudos, foi identificado que as excitações dinâmicas impostas principalmente na entrada das pás do rotor, oriundas da frequência de passagem das mesmas pelas palhetas diretrizes, eram responsáveis por tais trincas.



Figura 1 - Trincas que ocorreram em projeto semelhante

Isto também poderia ocorrer com o rotor de Ponte de Pedra, o que levou o fornecedor a modificar o rotor original, logo após a sua fabricação, com o intuito de prevenir as trincas devido a esforços dinâmicos. Esta modificação resume-se em um corte feito na entrada das pás do rotor, conforme apresentado na Figura 2. Todavia, para confirmar as características do rotor modificado, foi feito novo ensaio de modelo com o mesmo.

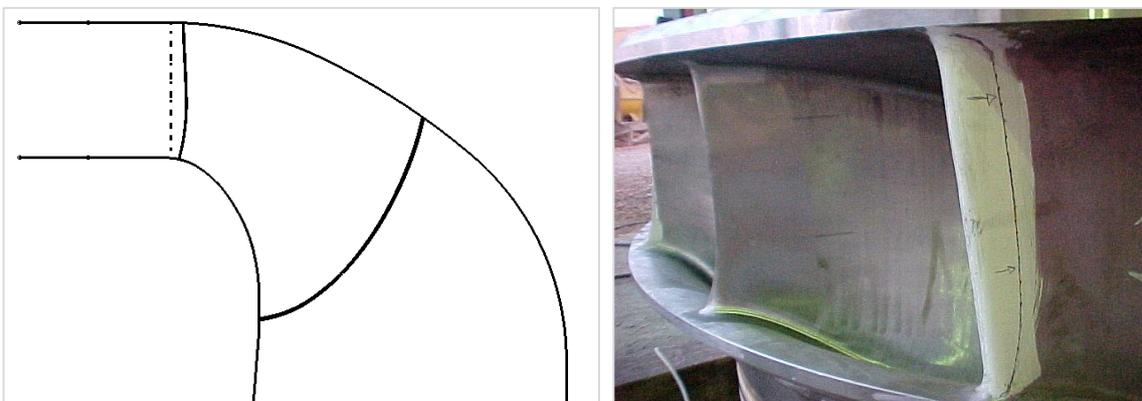


Figura 2 – Corte na entrada das pás do rotor da turbina

O corte reduziu as excitações dinâmicas no torque das pás de 34,3% para 15,2% - veja o resultado dos cálculos RSI na Figura 3 e Figura 4.

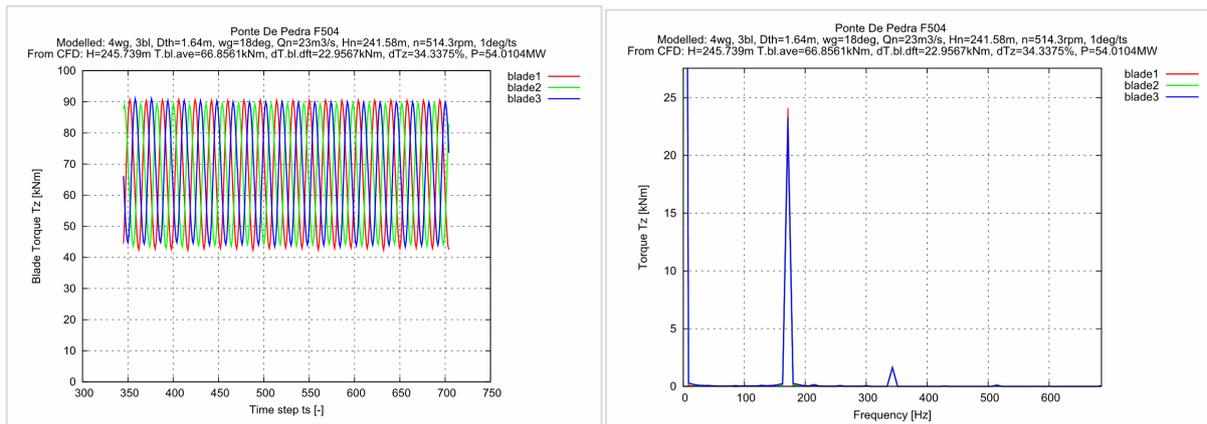


Figura 3 - Excitações dinâmicas nas pás do rotor original

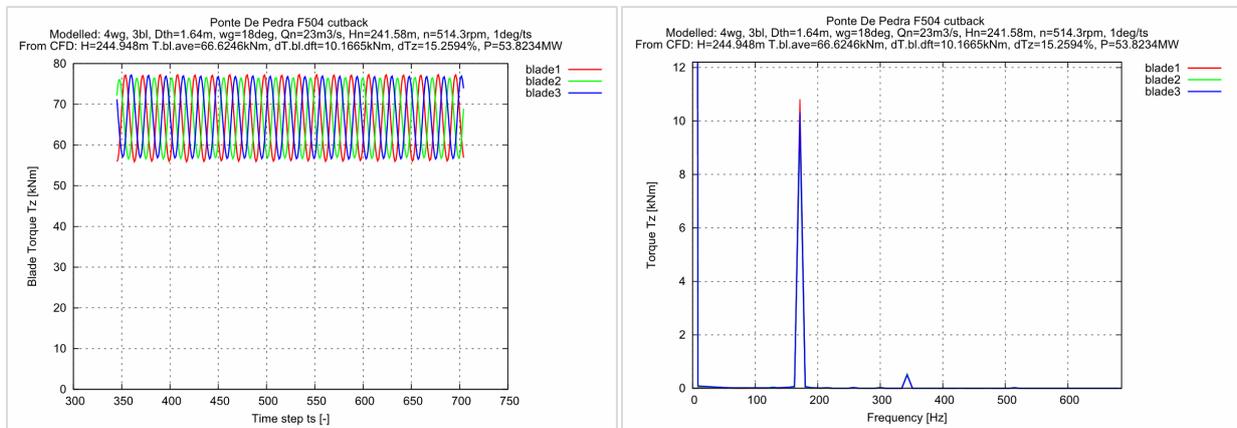


Figura 4 - Excitações dinâmicas nas pás do rotor modificado

2.2 Desgaste cavitacional

As três unidades geradoras entraram em operação entre julho e setembro de 2005. Desde o início da operação os rotores Francis instalados apresentaram desgastes cavitacionais que não atendiam a algumas das garantias contratuais, em especial, o limite de profundidade para regiões com desgaste concentrado. Alguns destes desgastes cavitacionais, estranha e atipicamente, ocorriam no lado de pressão das pás do rotor da turbina, e chegaram a desgastar a total espessura de algumas pás do rotor. A Figura 5 apresenta uma visão geral da situação dos desgastes em uma das inspeções.

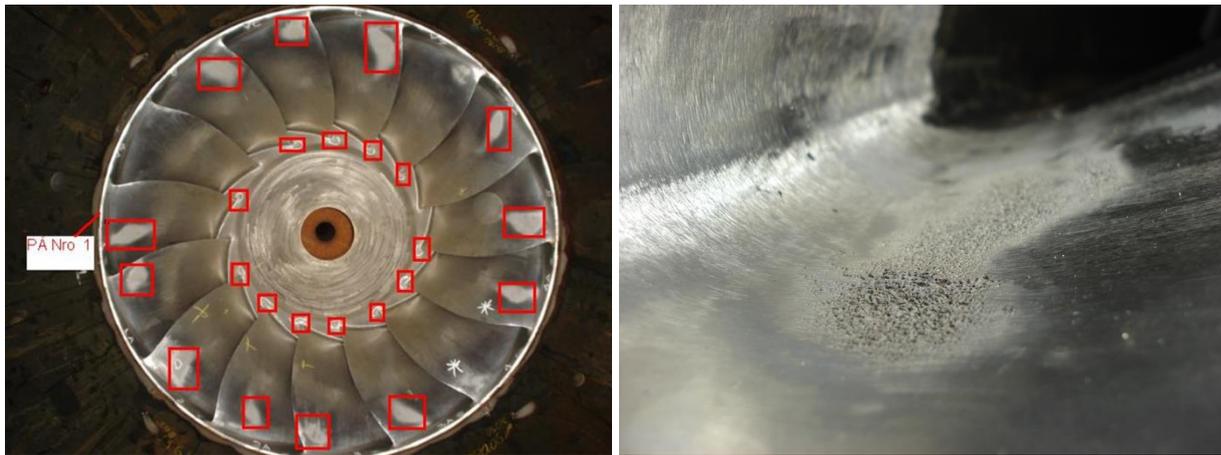


Figura 5 - Desgaste cavitacional identificado na inspeção do rotor

Diversas investigações e análises foram feitas, em especial a verificação dimensional do perfil das pás do rotor. As primeiras verificações se concentravam nas regiões de entrada e saída das pás devido às mesmas possuírem um comprimento muito grande. As verificações finais foram feitas com um sistema tridimensional tipo braço robótico, com uma extensão especial para viabilizar a inspeção de toda superfície das pás do rotor. Tal medição, conforme apresentado na Figura 6, finalmente evidenciou os desvios de fabricação causadores das intensas cavitações que estavam ocorrendo.

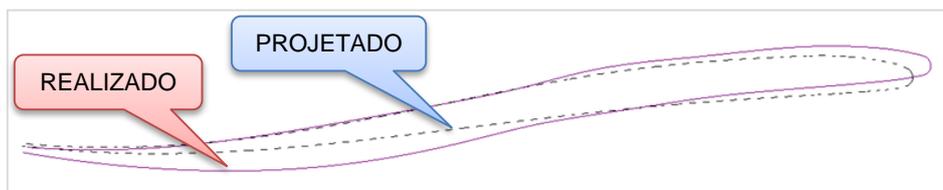


Figura 6 - Perfil da pá do rotor

Com o perfil real medido, foi reconstruído a superfície no CAD e feito simulação numérica em CFD para avaliar o campo de pressão. Na se confirma os principais pontos de cavitação encontrados no rotor.

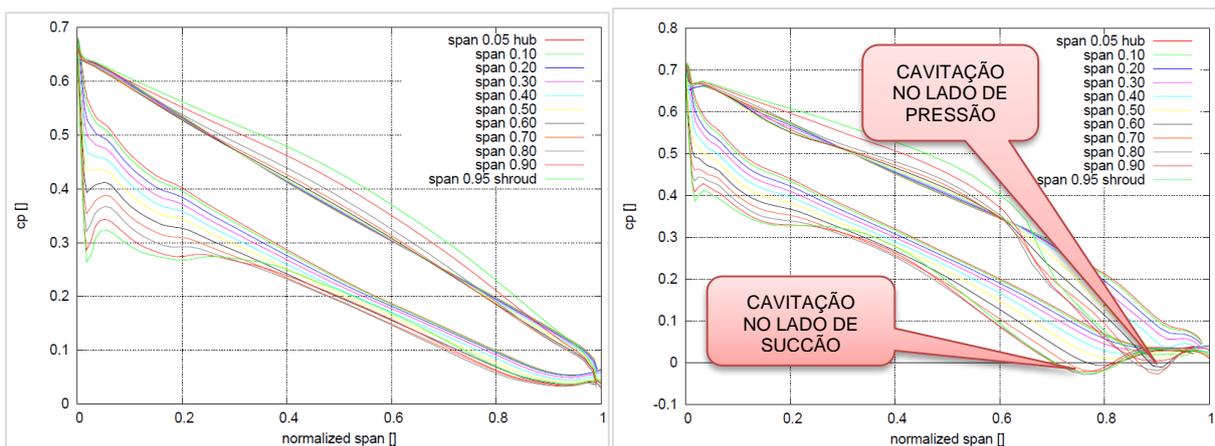


Figura 7 - Campo de pressão da simulação de CFD: perfil projetado x realizado

2.3 Novo rotor otimizado

Em função destes problemas nos rotores, e após diversas investigações e análises, foi acordado entre Andritz Hydro S.A. (AH) e Engie Brasil Energia (EBE) a substituição de tais rotores por outros com um novo projeto hidráulico, e fabricado a partir de componentes fundidos e soldados, e não mais fundido em uma única peça, objetivando mitigar os riscos operacionais, que eram avaliados como significativos para a integridade das unidades geradoras a médio e longo prazos.

Neste momento, a EBE tomou a decisão de aproveitar a situação de substituição dos rotores das unidades, por rotores com projeto otimizado para as condições operacionais de Ponte de Pedra, buscando melhorar o desempenho geral das unidades, com foco em rendimento e cavitação. Estudos internos foram realizados pela EBE, que resultaram em uma nova tabela de ponderação de rendimentos, com base no histórico operacional, bem como a definição de limites de desgaste cavitacional mais rigorosa que a norma internacional vigente.

Sendo assim, um novo projeto hidráulico para o rotor da turbina foi concebido pela AH. O objetivo deste projeto foi de eliminar os problemas apresentados, visando atender os novos limites de cavitação além de apresentar melhor desempenho energético, através de maior rendimento e projeto otimizado para as condições operacionais reais. Tais condições foram representadas em uma tabela de ponderação de rendimentos, que serviu de base para a otimização do projeto do novo rotor. Para este caso, os estudos internos indicaram que não haveria viabilidade econômica em uma possível repotenciação. Na podemos ver algumas diferenças geométricas entre o projeto original e o novo.

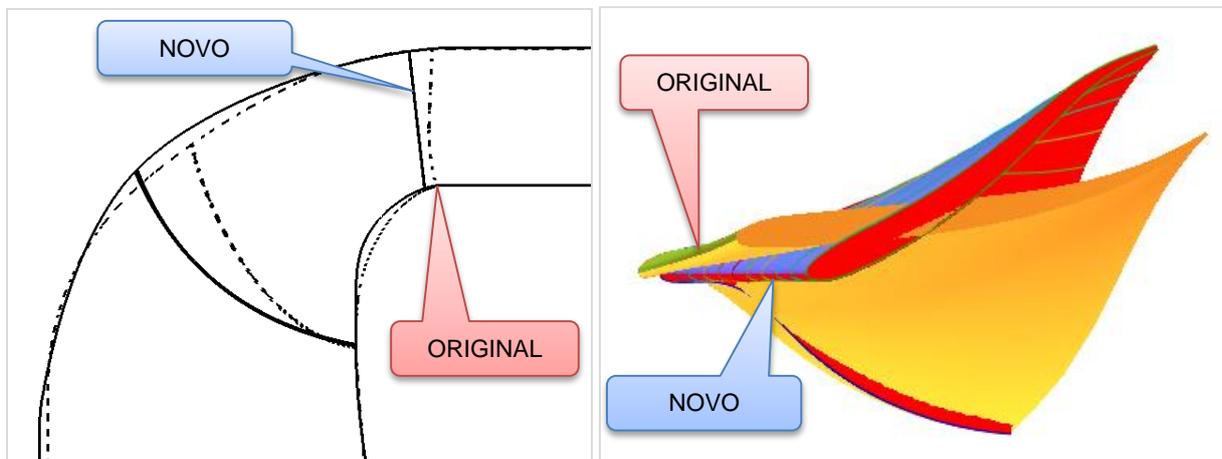


Figura 8 - Otimização do perfil: diferenças geométricas entre o original e o novo

O ensaio de aceitação em modelo reduzido da nova turbina foi realizado no laboratório de ensaios de modelo reduzidos da Andritz Hydro em Araraquara/SP – Brasil. De acordo com os resultados obtidos, demonstrando evidente incremento de desempenho em termos de eficiência energética da turbina, os três novos rotores foram fabricados pelo fornecedor, em sua unidade fabril em Ravensburg, Alemanha.

2.4 Ganhos extras

Outro fator que contribui satisfatoriamente para o aumento da garantia física da usina, foi o melhor desempenho do gerador em relação aos valores originalmente contratados. Apesar de ser uma característica que se apresentou desde o início da operação comercial da usina, tal fato não havia sido ainda considerado para o cálculo da garantia física (estava sendo utilizado o valor de rendimento estimado no projeto básico da usina). O rendimento do gerador havia sido medido durante um ensaio de campo, logo após a sua instalação. A Figura 9 mostra fotos do novo rotor sendo instalado na unidade geradora 1 da usina. Como o gerador não passou por mudanças durante a modernização os resultados de desempenho do ensaio original permanecem válidos.



Figura 9 - Novo rotor Francis da Usina Hidrelétrica de Ponte de Pedra

Ha ainda, outros dois aspectos que tem influência na geração de energia decorrentes da modernização:

- Aumento da disponibilidade: a necessidade de reparos aos desgastes cavitacionais no rotor da turbina, demandava paradas anuais mais extensas do que o esperado para a correção dos problemas. Com a solução da cavitação, os reparos não são mais necessários e, portanto, é de se esperar um aumento da disponibilidade da usina a médio prazo.
- Perda de carga: o melhor rendimento global da turbina, permite que a potência demandada pelo sistema possa ser atingida com menor vazão e, portanto, a perda de carga média também é menor, o que representa um benefício energético para o sistema.

2.5 Resultados obtidos

A evolução do rendimento estimado por CFD para as diferentes geometrias estão apresentadas na Figura 10.

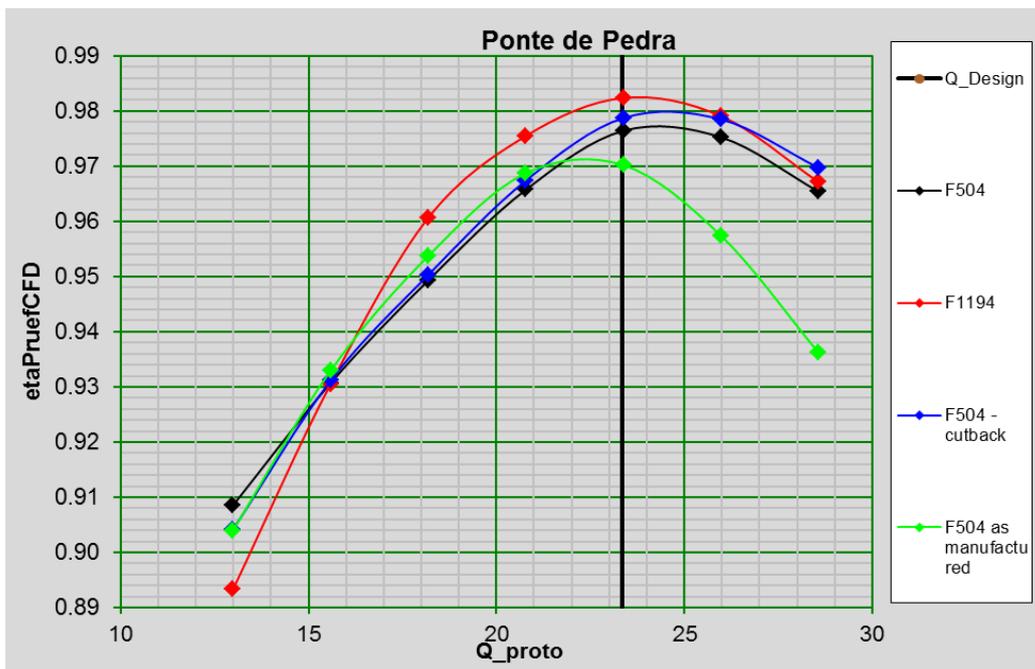


Figura 10 - Comparação do rendimento dos diferentes rotores: Original=F504; Modificado=F504 cutback; Fabricado=F504 as manufactured; Novo=F1194

Os principais resultados obtidos com os novos rotores Francis estão resumidos na Tabela 1, onde são comparados com os valores originais.

Tabela 1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS UNIDADES GERADORAS DA USINA HIDRELÉTRICA DE PONTE DE PEDRA

Característica	Original	Modernizado
Rendimento nominal da turbina	95,00%	95,12%
Rendimento médio da turbina	-	94,84%
Rendimento máximo da turbina	95,62%	95,72%
Rendimento nominal do gerador (*)	98,00%	98,48%
Rendimento médio do gerador (*)	-	98,41%
Rendimento médio da unidade geradora	92,00%	93,26%
Queda líquida nominal	242,57 m	242,57 m
Perda de carga média (estimada)	3,50 m	3,18 m

(*) com FP=0,90

Importante redução nas cargas dinâmicas sobre as pás do rotor também foram evidentes conforme se verifica na Figura 11. Os valores caíram de 35% no rotor original para 15% no modificado e 7% no novo.

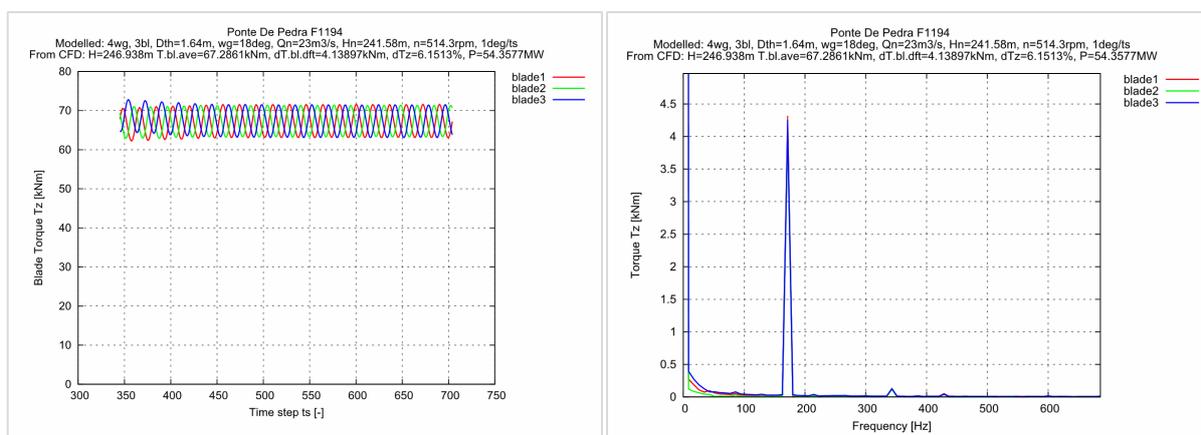


Figura 11 - Excitações dinâmicas no novo rotor

Outro resultado interessante já avaliado é relativo aos danos cavitacionais. As duas primeiras unidades modernizadas já ultrapassaram a marca de 8000 h de operação. A inspeção contratual prevista para avaliar a condição dos rotores não identificou nenhum sinal de cavitação após esse período, conforme apresentado na Figura 12, o que superou significativamente as garantias estabelecidas para a modernização que estão apresentadas na Tabela 2 [1].

Tabela 2 - GARANTIAS CAVITACIONAIS PARA A USINA HIDRELÉTRICA PONTE DE PEDRA [1]

Crítérios para 8000 horas	Garantia original	Novas garantias
Volume de material removido	283,0 cm ³	60,5 cm ³
Profundidade máxima generalizada	3,0 mm	2,2 mm
Profundidade concentrada (pequenas áreas)	5,0 mm	3,3 mm
Proporção máxima da área cavitada por pá	5,0 %	2,7 %



Figura 12 - Rotor da unidade 1 da Usina Hidrelétrica de Ponte de Pedra durante a inspeção de 8000 h [2]

Cabe destacar que apesar dos problemas cavitacionais relatados no rotor original, as operações das unidades geradoras em geral eram suaves, sem flutuações de pressão e de potência que exigiam atenção. Contudo os novos rotores também apresentaram um desempenho que superou favoravelmente o desempenho dos antigos. A operação das unidades, mesmo em carga parcial, é suave.

3.0 - CONCLUSÃO

As diferenças de desempenho entre as unidades original e modernizada permitiram recalcular a garantia física da usina, segundo a metodologia oficial da Empresa de Pesquisa Energética [3]. Mesmo sem considerar os efeitos positivos da redução da perda de carga média, a garantia física após a modernização foi de 133,5 MWh/h, diante de 131,6 MWh/h antes da modernização. Esta diferença representa um aumento de 1,44% na energia disponível para ser comercializada.

Adicionalmente ao desempenho de rendimento, a vida útil do rotor teve importante aumento com base no cálculo de fadiga após a grande redução do carregamento dinâmico das pás do rotor.

4.0 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.P. Ferretti, "Modernização da usina hidrelétrica Ponte de Pedra - Processo: ANEEL 48500.006330/2013-27- Revisão extraordinária da garantia física," Engie Brasil Energia, julho 2015.
- [2] R. Straatmann, M. Trettel e M. Castellar, "UHPP – Relatório de Inspeção do Rotor UG1 8000h," Andritz Hydro Inepar, maio 2016.
- [3] Empresa de Pesquisa Energética, EPE, [Online]. Available: <http://www.epe.gov.br>.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Alexandre Puls Ferretti, nascido em 19/12/1974, em Santo André/SP. Graduado em Engenharia Mecânica, pela Unicamp em 1997, e pós-graduado em Gestão de Projetos pela Fundação Vanzolini/USP, em 2002. Trabalhou por 17 anos em multinacionais como Alstom, GE e Andritz. Desde 2015 trabalha com Engenharia de Manutenção na Engie.

Fernando Luiz Hain, nascido em Rancharia – SP, em 27/12/1983. Formado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE - campus Foz do Iguaçu-PR, em 2007. Atua na área de Geração Hidráulica há 9 anos, sendo 2 na área de Manutenção e 7 na área de Engenharia de Manutenção da Engie.

Leonir Juarez Cibulski, nascido em Itatiba do Sul/RS, em 30/01/1986. Formado em Eng. Mecânica pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - Campus de Erechim/RS, atua na área de Geração Hidráulica há 12 anos, sendo 9 na área técnica e 3 na Engenharia de Manutenção da Engie.



Richard Allan Straatmann (*), nascido em 06/09/1966, em Porto Alegre/RS. Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté em 1991, pós-graduado em Técnicas Computacionais Aplicadas à Engenharia Mecânica pela UNICAMP em 1994, em MBA Gerência de Produção e Tecnologia pela UNITAU em 2001, mestrado (incompleto) em Otimização de Turbomáquinas na UNIFEI em 2011. Trabalhou por 20 anos na GE Renewable Energy (anteriormente Alstom Power, Mecânica Pesada). Desde 2008 trabalha na Andritz Hydro, sendo atualmente responsável pela área de Engenharia Hidráulica.

Sven von Fellenberg, nascido em 1977 na Suíça. Graduado e mestrado em Engenharia Mecânica pelo *Swiss Federal Institute of Technology* em 2004. Desde 2005 trabalha na Andritz Hydro na área de pesquisa e desenvolvimento hidráulica de turbinas, sendo líder de projeto desde 2014. Ganhou medalha de prata no concurso *artistic cavitation* no *Francis World Games* em 2012, Trondheim. Especializado no projeto do perfil hidráulico de rotores de turbinas, para projetos novos e reabilitação.

(*) autor de contato