



**XXIII SNPTEE  
SEMÍNÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GGH/32  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - I**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**USINA HIDRELÉTRICA DE SINOP –  
STATUS DE IMPLEMENTAÇÃO DESSE PROJETO KAPLAN DE GRANDE PORTE**

**Maurício Daniel Formaggio (\*)  
ANDRITZ HYDRO**

**Bartos Cviatal Wykrota  
ANDRITZ HYDRO**

**Alexandre Puls Ferretti  
ANDRITZ HYDRO**

**RESUMO**

A UHE Sinop é equipada com duas turbinas Kaplan de 8,85 m de diâmetro, 204 MW de potência cada, consideradas as mais potentes Kaplan instaladas no Brasil até o momento, e uma das maiores do mundo. Justamente por isso, todas as passagens hidráulicas, desde a tomada d'água até o tubo de sucção, foram desenvolvidas buscando alto desempenho e *layout* compacto. Isso representou um desafio, pois esses objetivos normalmente seguem direções opostas.

Esse trabalho apresenta os principais aspectos técnicos, assim como todas as otimizações durante o desenvolvimento do projeto, enfatizando o projeto hidráulico e os testes em modelo reduzido feito no Brasil.

**PALAVRAS-CHAVE**

Kaplan de grande porte, Desenvolvimento hidráulico, Ensaio de Modelo, Alto desempenho, *Layout* Compacto.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

No primeiro trimestre de 2014, a ANDRITZ HYDRO Inepar assinou o contrato de fornecimento dos equipamentos para a implantação da Usina Hidrelétrica Sinop, no rio Teles Pires, Estado do Mato Grosso. Esta usina acrescentará 400 MW de potência, com 239,8 MW médios de garantia física de energia elétrica ao Sistema Interligado Nacional (SIN) quando em operação. Com duas turbinas Kaplan de eixo vertical com diâmetro aproximado de 8,85 m fornecendo 204MW de potência no eixo, as unidades geradoras da casa de força de Sinop estão entre as maiores do mundo para este tipo de turbinas. A Figura 1 apresenta uma perspectiva artística da casa de força da usina.

Como é característico em projetos Kaplan de grande porte, desde as primeiras etapas de sua concepção, o projeto foi continuamente aperfeiçoado considerando todos os aspectos das interfaces entre equipamentos eletromecânicos e o projeto civil. O objetivo sempre foi maximizar o retorno do investimento para o investidor, dentro do prazo estipulado, mantendo-se o compromisso de fornecer equipamentos de altíssimo nível tecnológico. .

Para a UHE de Sinop, foi previsto o desenvolvimento completo das passagens hidráulicas, incluindo projetos de componentes desde a tomada d'água até a saída do tubo de sucção, buscando uma turbina de alto desempenho, porém com um *layout* compacto da casa de força. Neste sentido, o projeto foi desafiador, pois depende do equilíbrio adequado entre os objetivos mencionados, contudo os mesmos, em geral, seguem direções opostas.

Buscando também o aperfeiçoamento do projeto, alguns aspectos técnicos foram alterados no início do projeto buscando a otimização geral já comentada, sobretudo com foco no aumento da geração de energia, o que levou a um ajuste na ponderação de rendimentos, aumento na proteção contra cavitação (margem em relação ao coeficiente de cavitação Sigma). Isso levou a necessidade de desenvolver hidráulicamente três rotores diferentes buscando a excelência no atendimento das necessidades do projeto. Também foram determinados critérios

bastante rígidos quanto ao comportamento cavitacional da turbina. Todos esses aspectos levaram a um planejamento estratégico que demandou o desenvolvimento do primeiro rotor, em quadro semi-homólogo ao que foi utilizado nas turbinas Kaplan da UHE Sinop, no laboratório da ANDRITZ HYDRO em Linz, na Áustria, enquanto os demais componentes homólogos dos modelos reduzidos eram produzidos para serem testados no laboratório da empresa no Brasil. Os resultados obtidos nesta fase mais prematura, bem como intensivas simulações em CFD, foram determinantes para aperfeiçoar os demais componentes, sobretudo os rotores e as palhetas diretrizes.



FIGURA 1 – Perspectiva artística da UHE Sinop (imagem fornecida pela Triunfo Construtora)

O cronograma do projeto é bastante arrojado, refletindo a atual necessidade do mercado brasileiro, o que levou ao desenvolvimento do projeto hidráulico em duas frentes paralelas distribuídas entre as unidades da ANDRITZ HYDRO do Brasil e da Áustria. A equipe brasileira ficou responsável pelo maior escopo do desenvolvimento, cabendo à equipe austríaca o projeto da tomada d'água e caixa semi-espiral.

Esse projeto foi considerado um importante marco para o avanço tecnológico do Brasil, face ao porte das turbinas, ao sucesso atingido com o desenvolvimento hidráulico utilizando equipe altamente especializada no país, o *know-how* de mais de um século da ANDRITZ HYDRO no mundo, que contribuiu com a supervisão em todas as etapas do projeto, além da realização do primeiro ensaio de modelo reduzido de uma turbina Kaplan no país.

Esse trabalho irá apresentar em detalhes os aspectos que delinearam a solução técnica final, assim como todas as otimizações durante a fase de execução do projeto, enfatizando a elaboração dos perfis hidráulicos da caixa semi-espiral, palhetas fixas e móveis do distribuidor, rotor e tubo de sucção, além de descrever as principais ações para a execução dos testes em modelo reduzido, tais como projeto mecânico, fabricação e transporte dos componentes, calibrações, testes e compilação dos dados finais para verificação das garantias contratuais e seu envio para o cliente antes da realização do ensaio testemunhado.

## 2.0 - LAYOUT HIDRÁULICO

As características principais das turbinas da UHE Sinop estão apresentadas abaixo:

- Queda líquida nominal: 27,6 m
- Queda líquida máxima: 29,74 m
- Queda líquida mínima (contínua): 20,00 m
- Queda líquida mínima (temporária): 17,69 m
- Rotação síncrona: 94,74 rpm
- Potência nominal da turbina: 204 MW (27,6 m)

O layout hidráulico das turbinas da UHE Sinop foi bastante trabalhado para atender ao mesmo tempo as demandas do projeto civil quanto à escavação, dimensões principais e, sobretudo estabilidade da casa de força, além de assegurar que o escoamento tivesse as características necessárias para a melhor alimentação hidráulica dos componentes ativos. A Figura 2 apresenta estudos preliminares, em duas etapas distintas durante a execução do projeto, para o layout hidráulico da turbina. A interação entre as equipes técnicas foi essencial para o desenvolvimento adequado, mesmo que isso tenha demandado mais tempo do que o previsto inicialmente.

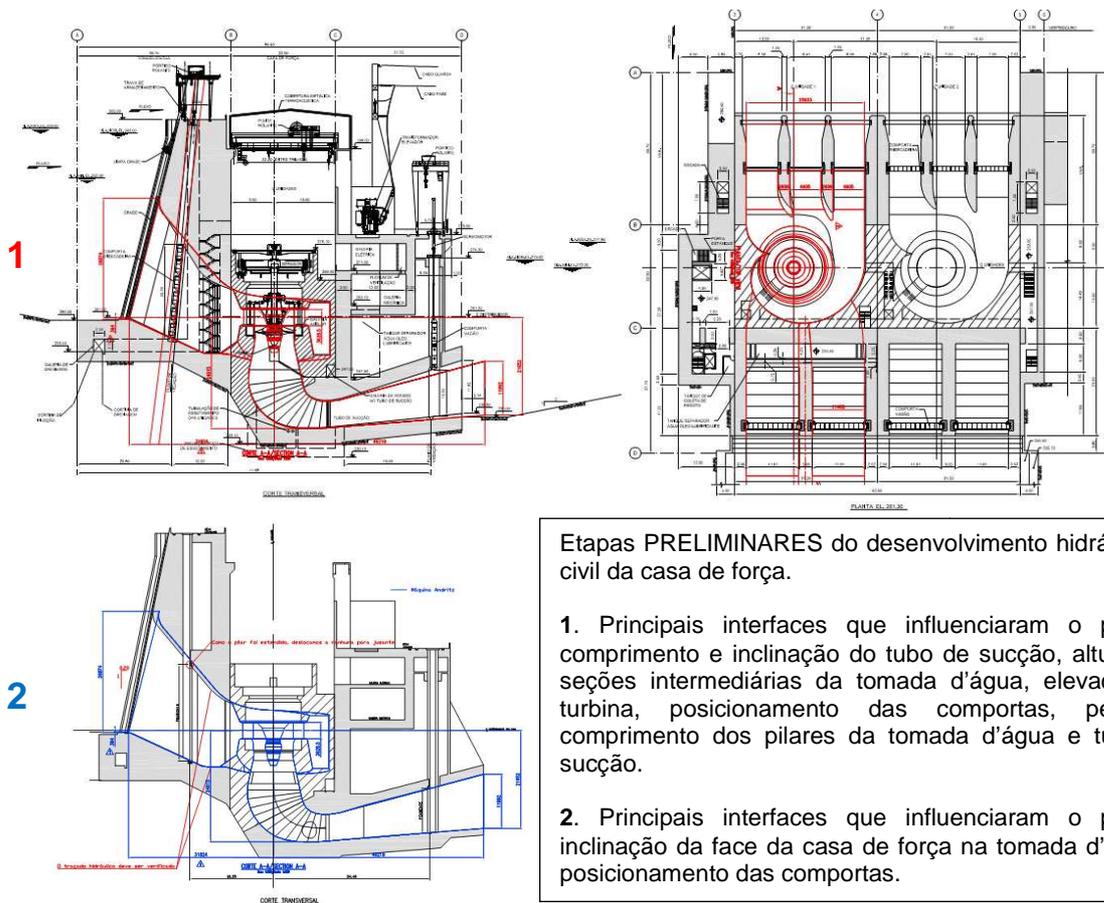


FIGURA 2 – Interação entre projeto hidráulico e civil em dois momentos distintos durante a execução do projeto

## 2.1 Tubo de Sucção

Para turbinas de baixa queda, sobretudo as turbinas do tipo Kaplan, o tubo de sucção tem uma importância fundamental para o desempenho, sobretudo rendimento, das turbinas. A Figura 3 apresenta estimativas de perdas típicas para cada um dos principais componentes de uma turbina hidráulica, em função da rotação específica ( $n_q$ ). Turbinas Kaplan, tipicamente tem  $n_q$  maiores que 110 [rpm]. Pelo gráfico pode-se demonstrar que as perdas do tubo de sucção são tão importantes quantos as perdas do rotor.

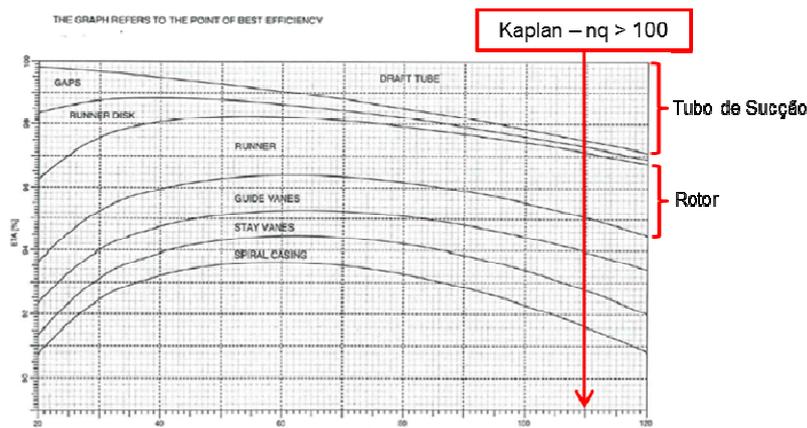


FIGURA 3 – Perdas típicas de cada componente de uma turbina (referência sobre o ponto de melhor rendimento) O tubo de sucção foi projetado com base em um modelo pré-existente, contudo haviam mudanças importantes que seriam aplicadas a turbina da UHE Sinop. Buscando atender às necessidades da casa de força e manter ou melhorar o desempenho do tubo de sucção de referência, duas mudanças são destacadas:

- i) Utilização de apenas um pilar, enquanto o tubo de referência possuía dois pilares;
- ii) Extensão do comprimento do tubo com uma leve mudança na inclinação da parte final do mesmo.

A Figura 4 apresenta sucintamente uma comparação entre o novo tubo e a sua referência anterior.

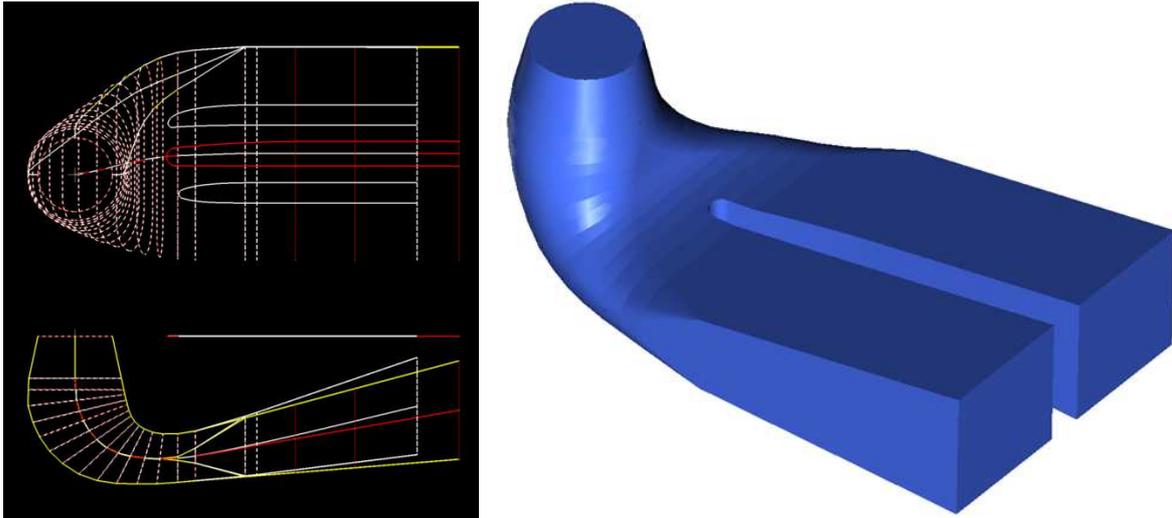


FIGURA 4 – Comparação entre um tubo de sucção de referência para turbinas Kaplan e o do projeto de Sinop

Diretamente associado ao rendimento do tubo de sucção, está à estabilidade do mesmo. Próximo ao ponto de melhor rendimento do rotor, o fluxo na entrada do tubo de sucção apresenta baixo *swirl* (movimento em forma de redemoinho), ou seja, o padrão do escoamento apresenta componentes tangencial e radial de velocidades baixas, o que em determinadas geometrias do tubo de sucção podem causar um descolamento do fluxo em regiões com difusão, como entrada do cone até secções intermediárias do cotovelo, e do final do cotovelo até a saída do difusor final tubo de sucção. O descolamento nas paredes geram perdas muito elevadas, além de prejudicar a estabilidade como um todo. Portanto no projeto do tubo de sucção, a análise de estabilidade é feita com o objetivo de criar um perfil geométrico que seja estável com o menor *swirl*, favorecendo, portanto o projeto do rotor.

A Figura 5 apresenta o estudo de estabilidade realizado para o tubo de sucção de Sinop. A linha azul representa o limite teórico a ser respeitado para evitar o descolamento do fluxo. Após a primeira análise de estabilidade, realizada de maneira analítica, simulações através de CFD foram conduzidas para verificar o comportamento do escoamento e estimar as perdas para diferentes condições de carga.

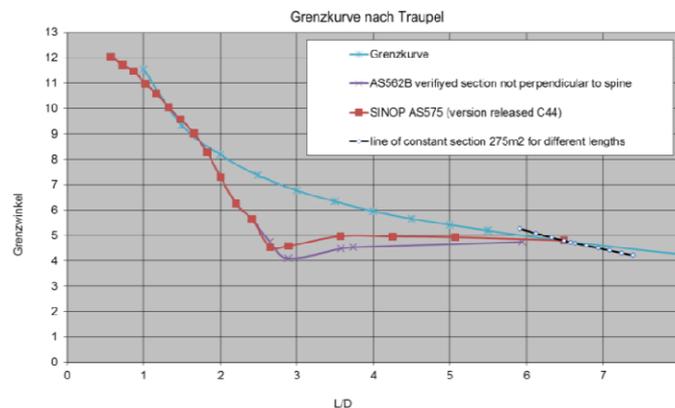


FIGURA 5 – Estudos de estabilidade considerando as necessidades

## 2.2 Rotor

O rotor da UHE Sinop é um dos maiores rotores Kaplan já projetados pela ANDRITZ HYDRO, com 8,85 m de diâmetro externo. Ele possui cinco pás, acionadas por um mecanismo interno que trabalha com alta de pressão de óleo (160 bar), permitindo uma relação entre os diâmetros do cubo e das pás da ordem de 40%, que se demonstrou bastante favorável para o projeto hidráulico de uma turbina com queda nominal de 27,6 m, e com uma vazão nominal que supera os 800 m<sup>3</sup>/s.

Além do alto rendimento atingido, o comportamento cavitacional desse rotor merece destaque. Havia uma necessidade de ser garantir altas margens de proteção em relação ao coeficiente de cavitação ( $\Sigma$ ), superiores aos critérios internos da empresa para esse tipo de turbina, garantindo uma proteção muito elevada quanto à cavitação, além da demanda de um comportamento cavitacional que apresentasse a pá sem bolhas fixas (em contato direto) com a superfície nos pontos operacionais mais críticos. Contudo, é aceito que bolhas que se desprendam da superfície ou bolhas oriundas das folgas entre as pás, cubo e aro da câmara estejam presentes.

### 2.2.1 Interação entre resultado de laboratório e CFD

A estratégia para o projeto do rotor foi elaborada com a possibilidade de se ter retorno sobre o desempenho de um perfil, através de resultados intermediários de ensaios de modelo em quadros semi-homólogos e quadros completamente homólogos. Entre cada etapa de testes eram realizadas simulações por CFD e análises mecânicas para o perfil da pá seguinte. A Figura 6 apresenta um exemplo de como a interação entre simulação e laboratório são importantes para se identificar o pontos que precisam de melhorias, com ênfase para cavitação próximo ao cubo e também na extremidade da pá.

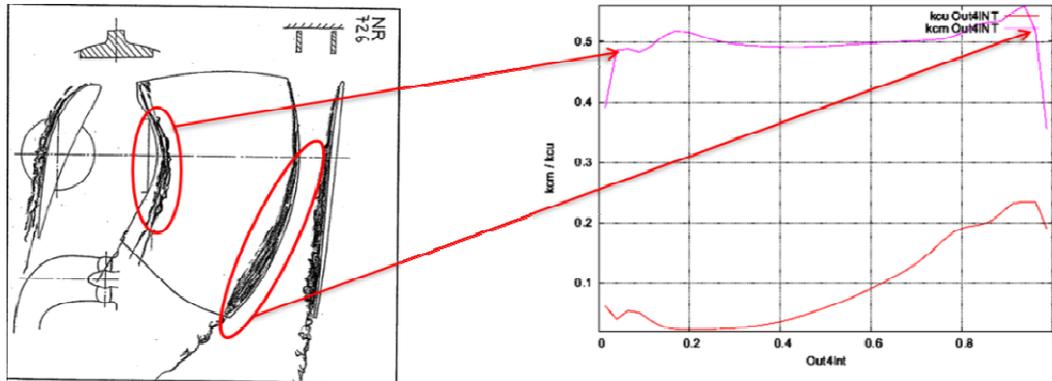


FIGURA 6 – Resultados de teste em laboratório e simulação

Para o caso da UHE Sinop, devido ao cronograma desafiador, foram utilizados dois laboratórios para a realização dos testes, sendo um na Áustria e outro no Brasil. Graças a um bom projeto do primeiro perfil de pá e a uma boa correlação entre as simulações e os resultados de modelo, foram necessárias apenas duas interações entre testes em laboratório, projeto do perfil e simulações, para que todos os critérios desse projeto fossem atendidos ou até mesmo superados com o demonstrado pelos resultados dos testes feitos com o terceiro rotor. Observa-se que além dos principais parâmetros garantidos, com rendimento médio ponderado, margem de Sigma, flutuação de pressão no tubo de sucção e na caixa semi-espiral, outros parâmetros e critérios internos, como velocidade de disparo, imagens de cavitação, empuxo hidráulico (apenas no terceiro rotor) eram avaliados simultaneamente para cada um dos perfis desenvolvidos.

### 2.2.2 Perfis das pás do rotor

Como mencionado anteriormente, para as turbinas da UHE Sinop foram desenvolvidos três perfis de pás, até que todos os resultados fossem atingidos em ensaio de modelo. Os resultados dos testes, sobretudo no aspecto rendimento e cavitação, forneciam um importante retorno para o projeto do perfil das pás.

Os resultados visuais da cavitação, por exemplo, quando comparados ao campo de pressão obtido no CFD, ou ao perfil de velocidades na saída das pás, permitiam validar ou corrigir as previsões, permitindo o ajuste do perfil de maneira a se obter a melhoria no desempenho de maneira correta. A Figura 7 apresenta um série de resultados de simulações para diferentes condições operacionais buscando a melhora do rendimento, bem como a comparação visual entre o campo de pressão do primeiro perfil de pá que foi testado em laboratório e o perfil final, ambos para as mesmas condições operacionais.

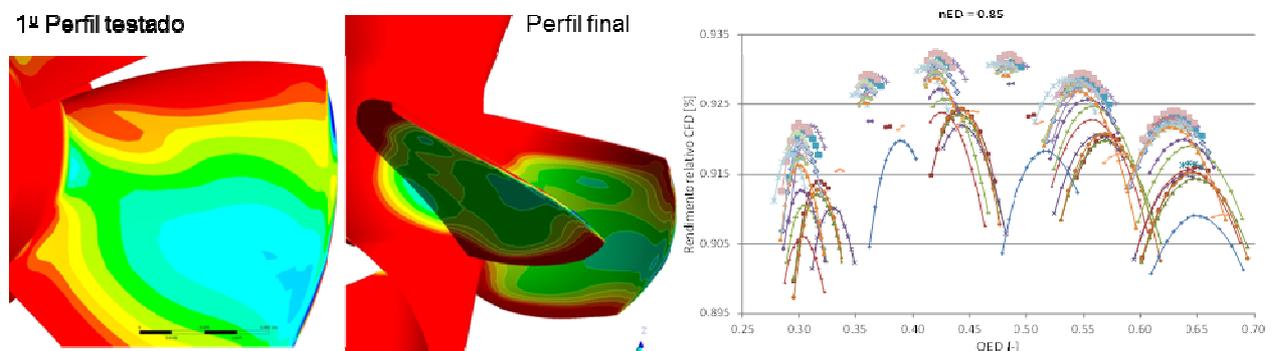


FIGURA 7 – Campo de pressão para o primeiro perfil testado em laboratório e o perfil final, e evolução do rendimento relativo por CFD para diferentes versões do perfil das pás

Os cálculos mecânicos para cada perfil projetado também forneceram informações essenciais para a determinação dos perfis de espessura para cada pá. Essa interação permitiu ao mesmo tempo, projetar pás mecanicamente mais seguras, e ainda obter uma redução da massa entre o início o fim do desenvolvimento hidráulico das pás do rotor.

### 2.3 Caixa Semi-espiral, Pré-distribuidor e Distribuidor

O desenvolvimento da caixa semi-espiral, pré-distribuidor e distribuidor foram guiados principalmente pelas restrições dimensionais que haviam sido determinadas durante a fase prévia ao leilão. Um dos grandes objetivos dessa fase era definir um projeto que permitisse uma casa de força bastante compacta, mas que ainda fornecesse uma turbina com ótimo desempenho, sobretudo o rendimento médio ponderado e bom comportamento cavitacional. A largura total do bloco civil, portanto foi otimizado através de dimensões relativamente compactas das passagens hidráulica, um alinhamento total entre os limites laterais da caixa semi-espiral e do tubo de sucção.

O pré-distribuidor foi então definido com 24 palhetas fixas buscando um projeto de pré-distribuidor que também fosse mais compacto, quando se comparado a um projeto típico com 12 palhetas fixas. Dessa maneira, mesmo com um circuito compacto, foi possível projetar um distribuidor com 24 palhetas com diâmetro muito próximo do que seria para um projeto típico com essas características da UHE Sinop. Mesmo assim, considerando que as grandes aberturas das palhetas diretrizes para a condição de maior vazão, as palhetas diretrizes tiveram na sua parte inferior o perfil hidráulico modificado para evitar escoamentos secundários de grande importância, que poderiam ser prejudiciais para a turbina. A Figura 8 apresenta a palheta com o perfil na parte inferior em destaque.

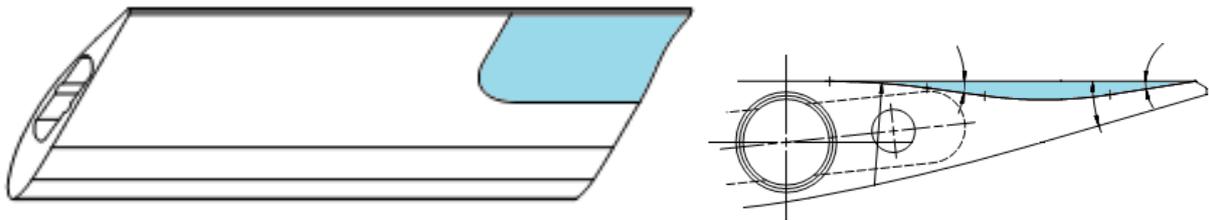


FIGURA 8 – Palheta diretriz. Destaque para o perfil na parte inferior da palheta que é mais fino (“sharpening”)

### 2.4 Ensaio de Modelo Reduzido

O objetivo do ensaio de modelo reduzido das turbinas da UHE Sinop, realizado na ANDRITZ HYDRO em Araraquara, Brasil, foi confirmar o desempenho hidráulico além, claro das etapas de desenvolvimento já descritas, e também comprovar as garantias através do ensaio testemunhado, dentre elas potência, rendimento, margem de sigma e flutuação de pressão. Além das verificações das garantias, outros testes foram realizados para verificaram disparo, torques em algumas palhetas diretrizes e pás do rotor, empuxo axial além de avaliar qualitativamente a flutuação de torque. O ensaio testemunhado seguiu a norma IEC 60193/1999 em todas as suas etapas, sendo executado em 12 dias trabalhados, e concluído com sucesso no início de Dezembro de 2014.

#### 2.4.1 Cavitação

A turbina apresentou um comportamento cavitacional muito positivo em toda a faixa operacional, mesmo nas condições temporárias de sobre potência e com as quedas mais baixas. A Figura 9 apresenta o resultado do teste de cavitação para a condição nominal com  $\Sigma_{plant}$  (Sigma de instalação).

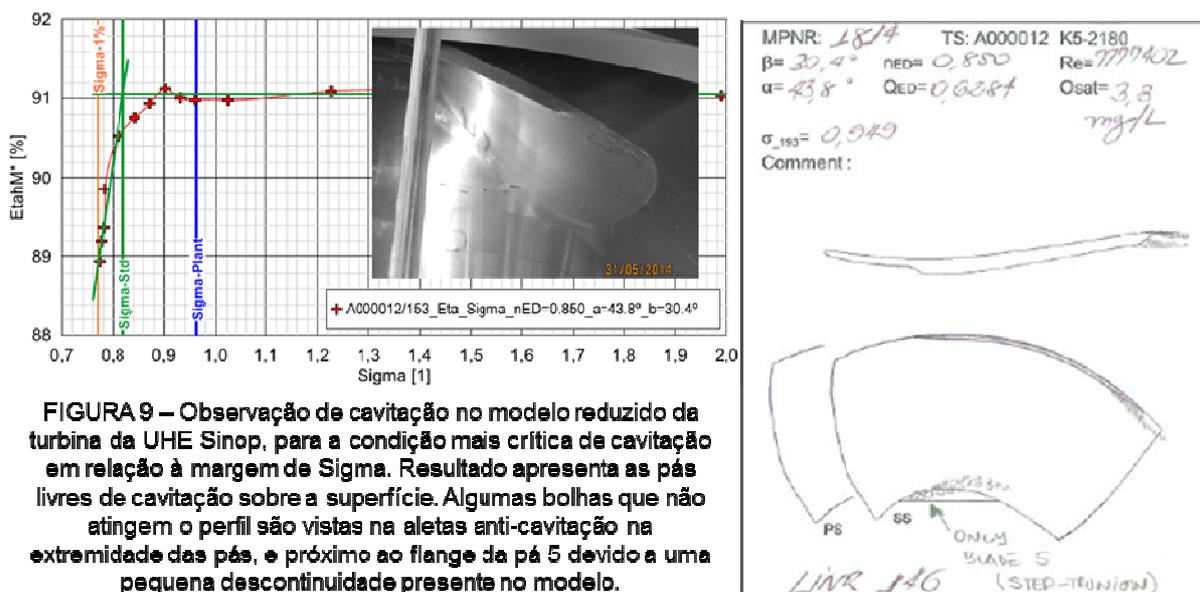


FIGURA 9 – Observação de cavitação no modelo reduzido da turbina da UHE Sinop, para a condição mais crítica de cavitação em relação à margem de Sigma. Resultado apresenta as pás livres de cavitação sobre a superfície. Algumas bolhas que não atingem o perfil são vistas na aletas anti-cavitação na extremidade das pás, e próximo ao flange da pá 5 devido a uma pequena descontinuidade presente no modelo.

## 2.4.2 Flutuação de Pressão

Apesar de se tratar de uma turbina Kaplan, onde em geral a estabilidade não é um problema, foi realizada uma grande investigação de flutuação de pressão no tubo de sucção e na caixa semi-espiral. O principal objetivo era verificar se poderia haver alguma condição operacional onde houvesse instabilidades de origem hidráulica de grande amplitude.

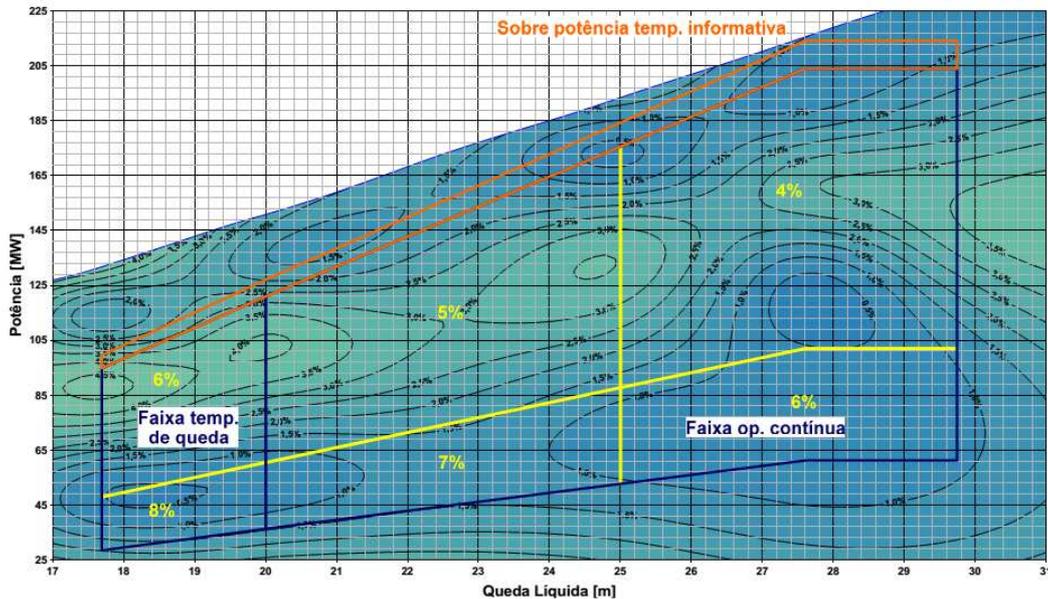


FIGURA 10 – Colina de flutuação de pressão no tubo de sucção. Garantias em amarelo no centro de cada região.

As garantias foram baseadas em valores RMS obtidos através do espectro de frequência do sinal medido por três transdutores instalados no tubo de sucção, em um plano abaixo da linha de centro das pás, distante de 79% do diâmetro do rotor. Todos os valores medidos ficaram muito abaixo das garantias. A Figura 10 apresenta a curva de colina de flutuação de pressão no tubo de sucção, comparando com as garantias divididas dentro da faixa operacional.

## 2.4.3 Rendimento

O rendimento da turbina da UHE Sinop foi avaliado através de uma tabela de ponderação, composta por 18 pontos distribuídos em quatro quedas líquidas diferentes. O resultado obtido no ensaio de modelo reduzido foi de 94,72% superando em 0,26% a garantia.

## 2.5 Considerações gerais

Em Março de 2015, o projeto mecânico das turbinas está em estágio bastante avançado, e alguns componentes encontram-se já em fase da fabricação.

## 3.0 - CONCLUSÃO

Baseado no que foi apresentado neste artigo, com os resultados obtidos, e com a aprovação do cliente, é possível afirmar que o projeto hidráulico da turbina da UHE Sinop representa atualmente o que existe de melhor para turbinas Kaplan de grande porte. O desenvolvimento hidráulico da turbina da UHE Sinop foi realizado de modo interativo com diversas partes envolvidas e com um cronograma desafiador. Nas etapas iniciais foram realizadas algumas interações entre a ANDRITZ HYDRO e a projetista civil com o principal objetivo de aperfeiçoar o projeto como um todo, e sempre mantendo ou melhorando o desempenho da turbina. Isso apenas foi possível, pois diferentes equipes, altamente qualificadas, puderam trabalhar em paralelo, e também foi possível utilizar duas bancadas de ensaio de modelo reduzido, com componentes semi-homólogos para iniciar rapidamente o desenvolvimento do rotor. Essa abordagem apresentou-se adequada, pois os resultados obtidos atenderam ou superaram as garantias contratuais.

## 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEC 60193/1999 – *Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests*
- (2) *Short course in Hydraulic Machines and System Engineering* - Lecture L10.8: Axial Turbines Design, Norbert Haberteuer, Lausanne/Switzerland, 2010 – EPFL and Andritz Hydro

## 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**Mauricio Formaggio** juntou-se à Andritz Hydro em 2007 e trabalha no departamento de R&D . Ele trabalha como engenheiro de projeto hidráulico com foco principal em dinâmica de fluidos computacional. Ele é formado em Engenharia Mecânica na Universidade de São Paulo.

**Bartos Cvintal Wykrota** juntou-se à ANDRITZ HYDRO em 2012 trabalhando no departamento de R&D com projeto hidráulico de turbinas. Ele é graduado em Engenharia Mecânica-Aeronáutica pelo ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica em 1987 e em Mecânica dos Fluidos Industriais pelo INPG – França, em 1989. Ele trabalhou por mais de 20 anos com propostas técnicas de turbinas hidráulicas e com projeto hidráulico e ensaio de modelo reduzido de turbinas.

**Alexandre Ferretti** juntou-se à Andritz Hydro em 2007, inicialmente como gerente do laboratório de ensaio em modelos reduzidos, e em 2009, assumiu a gerencia de Pesquisa e Desenvolvimento. Ele participou de vários projetos do setor hidrelétrico ao longo de seus mais de 17 anos de experiência, trabalhando em diferentes empresas. Ele é formado em Engenharia Mecânica na Universidade Estadual de Campinas, com especialização em Gestão de Projetos, pela Fundação Vanzolini/USP.