



## GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

### MODELO REDUZIDO PARCIALMENTE HOMÓLOGO, TRANSPOSTO NUMERICAMENTE PARA A QUARTA UNIDADE DA UHE CURUÁ UNA (TURBINA KAPLAN)

**RICARDO DA SILVA RIBEIRO (1); CARMO GONÇALVES (2); CID ANTUNES HORTA (3); ANGELO TORRES MADUREIRA (4); KARINE ARNAUD (5)**  
**ELETRORBRAS ELETRONORTE, GE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

#### RESUMO

Este trabalho tem por principais objetivos apresentar os desafios e os resultados obtidos pela transposição numérica de um modelo reduzido de turbina Kaplan existente, parcialmente homólogo, para o projeto hidráulico de uma nova turbina que está sendo instalada em um antigo *block out* de concreto existente, na Usina Hidrelétrica de Curuá-Una. Apresentam-se também as análises técnicas face às não homologias existentes e pretende-se trocar experiências com os presentes para definir um limite a partir do qual possa ser utilizada a transposição de modelos reduzidos já ensaiados em laboratórios homólogos ou parcialmente homólogos com o auxílio de simulações numéricas.

#### PALAVRAS-CHAVE

Turbina Kaplan, Modelo Reduzido, Transposição Numérica, Não Homologias, Hidrelétrica de Curuá-Una.

#### 1.0 INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica de Curuá-Una situada no rio de mesmo nome, que é afluente do Rio Amazonas, está localizada no município de Santarém, que dista aproximadamente 70 km da sede do município, nas coordenadas geográficas 02° 48'45" de latitude Sul e 54° 17'55" longitude oeste. A concessão desta Usina Hidrelétrica, foi transferida da CELPA – Centrais Elétricas do Pará, para as Centrais Elétricas do Norte do Brasil – Eletrobras Eletronorte, por resolução autorizativa da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, no ano de 2005.

A Casa de Força existente contempla 3 (três) unidades hidrogeradoras, dotadas de turbinas do tipo Kaplan de eixo vertical com geradores síncronos trifásicos, com as seguintes principais características nominais: 2 (duas) unidades hidrogeradoras de 10 MW, 6,9 kV, 60 Hz, 200 rpm e fator de potência 0,80, que entraram em operação comercial em 1977; 1 (uma) terceira unidade hidrogeradora de 10,3 MW, 6,9 kV, 60 Hz, 200 rpm e fator de potência 0,95, que entrou em operação comercial em 1985. O rendimento máximo da turbina existente, ou seja, o olho da curva de colina é de 92,9%, para uma vazão de 41 m<sup>3</sup>/s e queda bruta de 21,7 mca.

Já pensando no crescimento da demanda por energia elétrica na região e considerando a disponibilidade hidráulica existente, na época foi construído um *block out* de concreto, para ser instalada mais 1 (uma) unidade hidrogeradora, também com turbina Kaplan de eixo vertical, de 10 MW.

Considerando a disponibilidade hídrica, que permite agregar energia firme, comprovada pelos estudos hidroenergéticos, a infraestrutura existente, os baixos impactos ambientais e o atingimento do aproveitamento ótimo, a Eletrobras Eletronorte, desenvolveu com recursos próprios, o Projeto Básico completo para a aquisição e instalação da quarta unidade, consultando os principais fabricantes de unidades hidrogeradoras do Brasil. Este projeto básico foi submetido e aprovado pela ANEEL.

Dos estudos e das simulações realizados, mesmo com as limitações da estrutura de concreto existente (tubo de sucção concretado, limites para o desenvolvimento da caixa semi-espiral e Tomada D'água concretada, com as ranhuras prontas para os stop logs) e com um afogamento bastante limitado para a nova turbina, concluiu-se que seria possível aumentar a potência da unidade em 25%, acima do previsto.

Com toda a documentação básica concluída, inclusive com o RFP – Request for Proposal realizado, a Eletrobras Eletronorte promoveu o processo licitatório e assinou o Contrato sob a forma de Empreitada Semi-integrada, conforme lei 13.303 de Junho de 2016 e Regulamento de Licitações e Contratos da Eletrobras de 2017, com o proponente vencedor, ou seja, com o CCU - Consórcio Curuá-Una, composto pela GE Energias Renováveis e Sistechne – Intertechne Sistemas S.A., em 20 de Maio de 2020 (no início da Pandemia de Covid 19).

As Especificações Técnicas contratuais da Turbina e Regulador de Velocidade, solicitaram uma turbina hidráulica do tipo Kaplan de eixo vertical, com potência, igual ou superior a 12,755 MW no seu eixo, para uma queda líquida nominal de 20,5 mca, deixando para o Fornecedor, a liberdade de definir a sua rotação síncrona e optar pela realização dos ensaios de modelo reduzido em seu laboratório, ou apresentar um relatório de ensaio de modelo transposto numericamente, considerando um modelo homólogo ou parcialmente homólogo, com os tratamentos das não homologias, desde que as garantias contratuais e as normas técnicas IEC – 60193 de 1999 - *Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests* e IEC – 60609 - *Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Cavitation pitting evaluation*, fossem atendidas em suas últimas versões.

A contratada, o CCU – Consórcio Curuá-Una, liderado pela GE – Energias Renováveis, considerando que possuía em seu acervo técnico, projetos de turbinas semelhantes, com ensaios de modelo reduzido realizados em laboratórios, testemunhados aprovados e considerando também o estágio atual de evolução dos softwares para o dimensionamento de turbinas hidráulicas, decidiu apresentar um Relatório de Ensaio de Modelo Reduzido Parcialmente Homólogo, Transposto, com a utilização de Simulação Numérica para a Turbina Hidráulica, mantendo a mesma rotação síncrona das turbinas existentes, ou seja, de 200 rpm.

A redução de custo com a utilização de um modelo reduzido parcialmente homólogo com a utilização de simulações numéricas, sem a realização dos ensaios laboratoriais testemunhados pelo Cliente é da ordem de 500.000,00 (quinhentos mil dólares americanos).

Este trabalho apresenta os principais resultados do Relatório de Ensaios de Modelo Reduzido da Turbina Transpostos com a utilização de simulações numéricas, e compara estes resultados com os garantidos contratuais.

Apresentam-se também os parâmetros restritivos devido as não homologias do circuito hidráulico de geração, englobando o tubo de sucção, a caixa semi-espiral e a tomada d'água, as análises técnicas realizadas com relação ao rendimento médio ponderado, ao fenômeno de cavitação, a estabilidade hidráulica da turbina, ou seja, o comportamento da turbina modelo e o esperado para a turbina protótipo para a sua faixa operacional, considerando as curvas de colinas obtidas.

Considerando a relevância da realização dos ensaios de modelo reduzido testemunhados em laboratórios para as turbinas hidráulicas, os avanços da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e ocorrências imprevisíveis do tipo Pandemia de Covid 19, pretende-se discutir e trocar experiências com os participantes deste importante Seminário, de forma a procurar estabelecer um limite, a partir do qual recomenda-se avaliar a realização de Ensaios de Modelo Reduzido com a utilização de simulações numéricas, partindo-se de um modelo existente homólogo ou parcialmente homólogo, já ensaiado em laboratório, testemunhado e aprovado por clientes, sem a realização de novos ensaios laboratoriais, que são bem dispendiosos.

## **2.0 PARÂMETROS RESTRITIVOS IMPOSTOS PELO BLOCK OUT DE CONCRETO EXISTENTE E FILOSOFIAS DE PROJETO**

Considerando o Block out de concreto existente, o porte da turbina hidráulica e as esperadas não homologias, que poderiam existir, com relação a um modelo reduzido homólogo já ensaiado em laboratório, as Especificações Técnicas contratuais deixaram a opção para os fornecedores optarem por apresentar um projeto da turbina com um modelo reduzido ensaiado em laboratório ou um modelo parcialmente semelhante com o tratamento por simulação numérica de forma que as seguintes garantias fossem atendidas:

- Rendimento médio ponderado de no mínimo 94% para a turbina protótipo;
- Comprovar a máxima velocidade de disparo para o projeto do gerador;
- Margem de segurança contra a cavitação para o modelo considerando que o sigma da instalação seja superior ao sigma standard ( $\sigma_p$ ) ou crítico ( $\sigma_{cr}$ ) em pelo menos 15%, ou seja,  $\sigma_p \geq 1,15 \sigma_{cr}$  (para a turbina protótipo a garantia de cavitação foi de acordo com a IEC 60609 - *Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Cavitation pitting evaluation*);
- O posicionamento correto das tomadas do winter-kennedy e determinar as constantes preliminares para a medição da vazão;
- Evitar as flutuações de pressão e de torque, excessivas que possam comprometer a estabilidade operacional da Turbina-protótipo;
- Fornecimento de todos os desenhos do modelo transposto com a utilização de simulação numérica.

Mesmo utilizando um modelo parcialmente homólogo, as principais passagens hidráulicas (rotor da turbina, pré-distribuidor, distribuidor, cone do tubo de sucção, caixa semi-espiral) foram homólogas com as suas correspondentes do protótipo. A proporção de similaridade entre a geometria do modelo reduzido de referência e a geometria do protótipo foi deduzida pelo fator de escala de 8,1579.

As principais diferenças entre o modelo reduzido adotado e a turbina protótipo com block out parcialmente concretado foram no comprimento e na entrada d'água da adução, na profundidade e inclinação do tubo, que podem ser observadas na Figura 01.

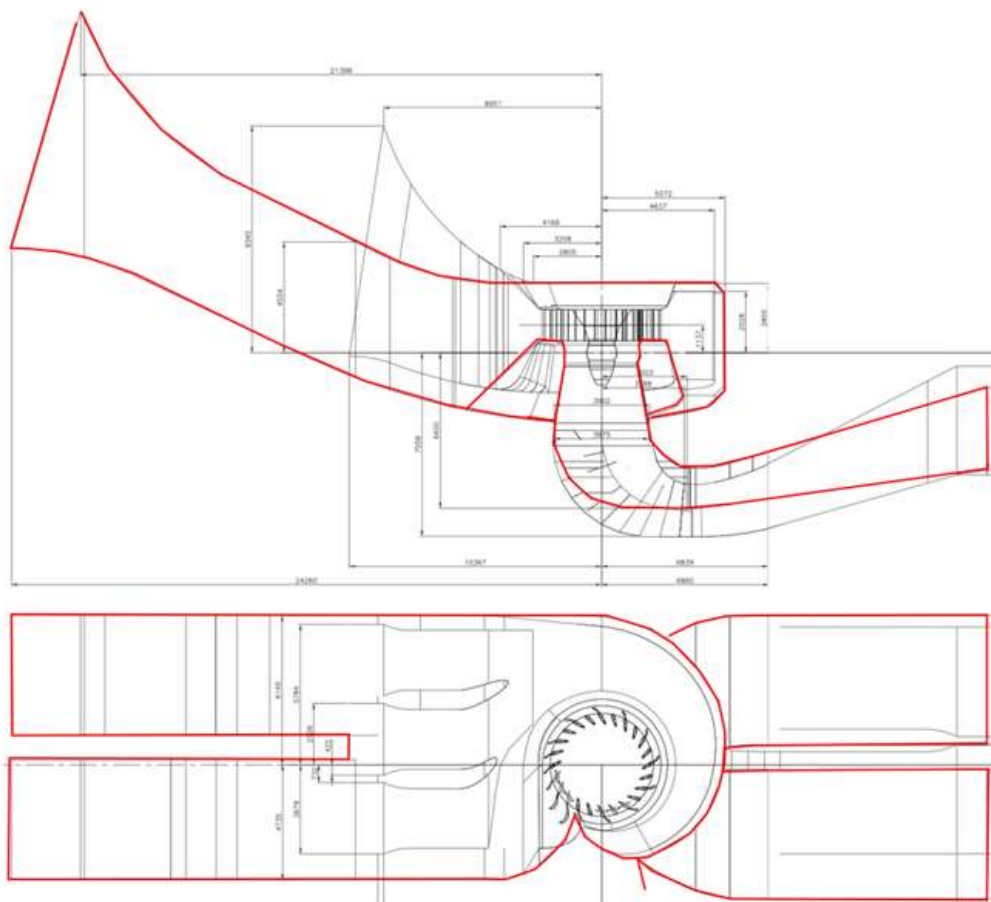


FIGURA 01 – Não homologias entre o modelo utilizado e o circuito hidráulico de geração da turbina protótipo parcialmente concretada.

Da Figura 01, observa-se que o avanço tecnológico desta turbina está limitado principalmente pela elevação do fundo do tubo de sucção e pela calagem existente. Embora a rotação da unidade foi de livre escolha do projetista, o Fornecedor optou pela rotação de 200 rpm, devido aos limites citados, o que coloca esta unidade dentro de parâmetros conservadores, considerando o atual estado da arte de turbinas hidráulicas, mas bem avançada, no que tange ao fenômeno de cavitação.

A Tabela 01 apresenta as principais características técnicas do modelo reduzido parcialmente homólogo utilizado como referência.

TABELA 01 – Principais Características da Turbina Modelo de Referência

Parâmetros	Símbolo	Unidade	Valores
Diâmetro do Rotor	Dm	mm	380
Latitude	-	[°]	45,16 Norte
Altitude		msnm	230
Gravidade	gm	ms <sup>-2</sup>	9,80567
Pressão de Vapor (28,3°C)	Tvp	Pa	3853.61
Queda Líquida	Hn	mca	5
Reynolds Ótimo	Re,m BEP	-	6.275.590

Foi realizada uma análise completa tridimensional de Navier-Stokes. Os cálculos foram simulados para todos os componentes hidráulicos da turbina: Caixa semi-espiral, palhetas fixas, palhetas diretrizes, rotor e tubo de sucção, tanto para projeto de referência, quanto para o projeto de Curuá-Una. O principal objetivo destes cálculos foi verificar

o bom comportamento hidráulico do projeto proposto, avaliar as performances hidráulicas e comparar com o projeto de referência.

### 3.0 ANÁLISE TÉCNICA E RESULTADOS OBTIDOS

Uma análise completa tridimensional de NavierStokes foi realizada, usando o programa CFX®.19.2 distribuído pela ANSYS Inc. Os cálculos incluíram todos os componentes hidráulicos da turbina: caixa semi-espiral, palhetas fixas, palhetas diretrizes, rotor e tubo de sucção. O objetivo destes cálculos foi verificar o comportamento hidráulico do modelo proposto e analisar a performance. Para uma análise CFD completa, as seguintes três etapas de cálculos foram necessárias para obter o desempenho da máquina:

- A primeira etapa consistiu em calcular a vazão na caixa semi-espiral, incluindo as palhetas fixas e diretrizes na abertura nominal;
- A análise do rotor foi realizada em uma segunda etapa através da modelagem de uma pá com contornos contínuos, antecedida pelo perfil da palheta diretriz;
- Finalmente, os cálculos foram feitos para o tubo de sucção.

Os cálculos foram realizados para cada parte hidráulica separadamente. Portanto, cada componente foi analisado de forma detalhada com o objetivo de obter os resultados mais precisos possíveis.

Com a finalidade de analisar o comportamento da vazão de Curuá-Una, a estratégia de análise do modelo CFD adotada foi calcular o desempenho para ambos os projetos, Curuá-Una e o de referência. Os cálculos da caixa semi-espiral, rotor e tubo de sucção foram realizados tanto para o modelo de referência quanto para Curuá-Una em condições similares (malhas e condições de contorno). Sendo assim, as perdas hidráulicas para cada modelo foram verificadas, bem como o comportamento da cavitação. E estas comparações permitiram comprovar que o desempenho esperado foi alcançado, como será apresentado a seguir.

As perdas de cargas calculadas para a caixa semi-espiral, palhetas fixas e palhetas diretrizes dos novos projetos, foram um pouco inferiores às perdas do modelo de referência, o que é ilustrado na Figura 02 a seguir.

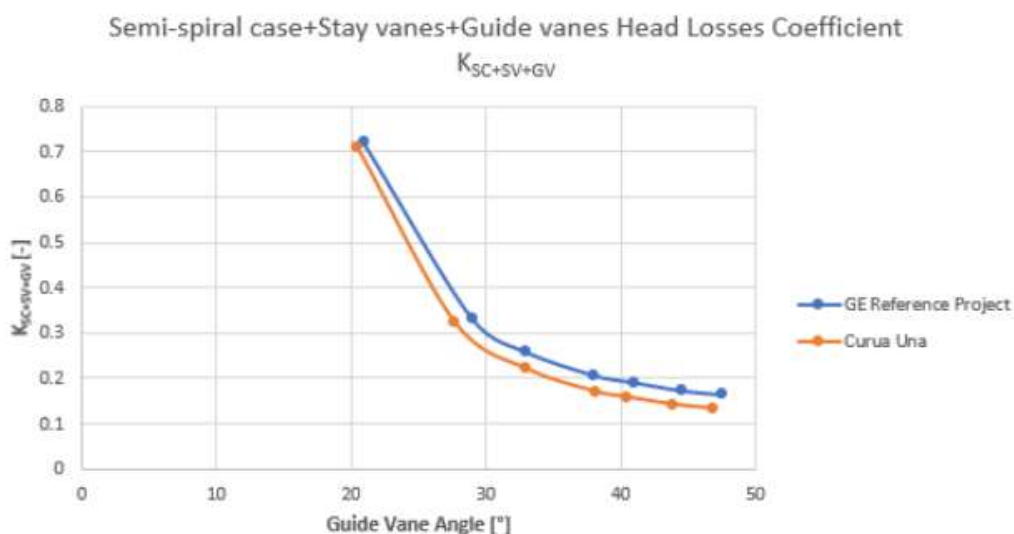


FIGURA 02 - Coeficiente de perdas de carga ( $K_{sc+sv+gv}$ ) calculado para o domínio da caixa semi-espiral+palhetas fixas + palhetas diretrizes, para Curuá-Una e projeto de referência.

No domínio dos cálculos do rotor da turbina foram consideradas a influência das palhetas diretrizes. As passagens hidráulicas entre a pá do rotor e o cubo e entre a pá do rotor e a cinta (os gaps), também foram modelados. As principais pequenas diferenças entre a vista meridional do rotor de Curuá-Una e o rotor de referência são o diâmetro do cubo e meio ângulo do cone do tubo de sucção.

A Figura 03 a seguir, apresenta a evolução das perdas de carga do rotor da turbina na vazão ótima próxima de 50 m³/s com o ângulo da pá do rotor de 22.67° para Curuá-Una e ângulo da pá do rotor de 22.92° para o projeto de referência.

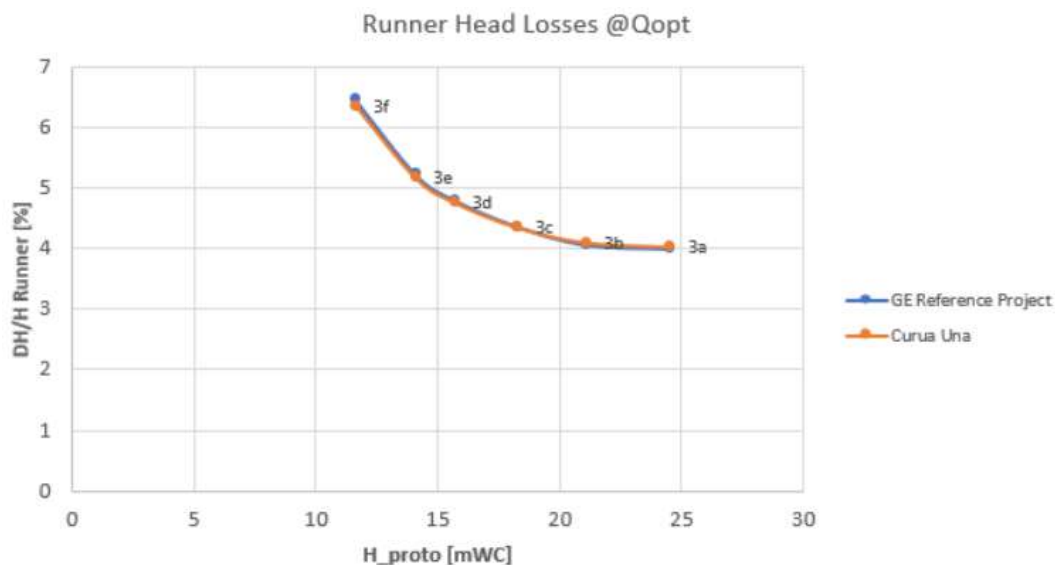


FIGURA 03 – Evolução das perdas de carga no rotor da turbina considerando a vazão ótima.

Os resultados obtidos mostram que as perdas de carga são muito próximas para ambas as configurações no ponto de vazão ótima. As demais perdas de carga também ficaram muito próximas do rotor de referência.

Para verificar o comportamento da cavitação no rotor de Curuá-Una, calcula-se, através dos resultados CFX, uma “pressão ajustada”, ou seja,  $P^*(M) = P(M) + \rho g Z$ , que é a pressão marcada com asterisco no ponto M, por exemplo na pá (mca), corresponde a variável pressão estática no CFX.

O valor de sigma da instalação é calculado da seguinte forma:

$$\sigma_{plant} = NPSH / H = (H_{atm} - T_{va} - (Z - TWL)) / H$$

Onde:

- NPSH é a queda líquida específica;
- H é a queda líquida
- $H_{atm}$  é pressão atmosférica absoluta média;
- $T_{va}$  é a pressão de vapor da água;
- Z é a elevação da cavitação de referência (elevação do eixo do rotor);
- TWL é a elevação do nível mínimo da jusante no caso de Curuá-Una.

A Figura 04 abaixo, apresenta os resultados da simulação para o fenômeno de cavitação, para Curuá-Una e para o modelo de referência.

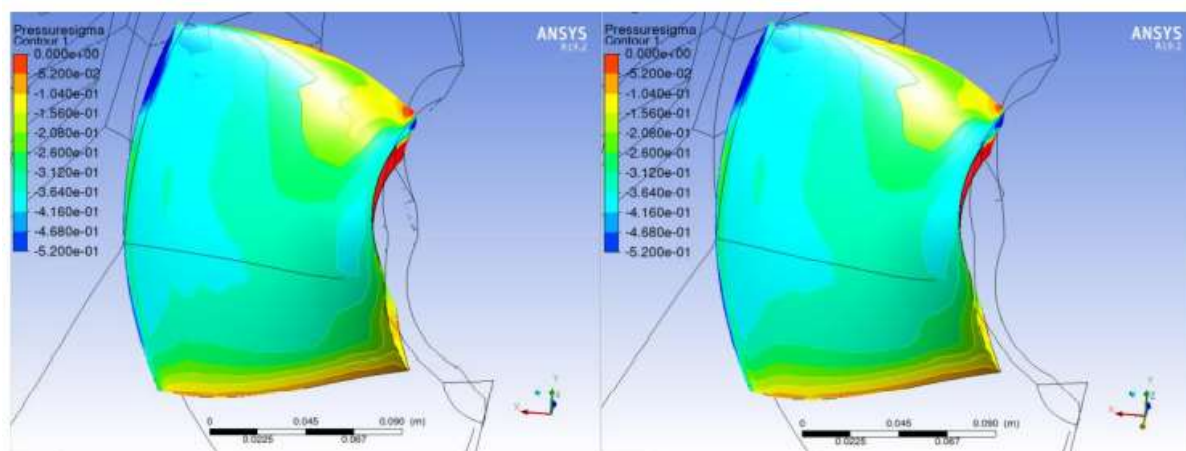


FIGURA 04 - Pressão ajustada no lado da sucção para o ponto de operação  $H=21.1\text{m}$  e  $Q = 61,98\text{ m}^3/\text{s}$  – Curuá-Una (esquerda) e Projeto de referência (direita).

Pode-se observar que o comportamento da cavitação neste ponto de operação será muito similar ao projeto de referência. Não há cavitação de entrada no lado da sucção para este ponto. Apresenta-se uma pequena região de cavitação próxima a periferia da pá, que pelos resultados da simulação não aparenta representar risco de erosão acima do previsto no Contrato para turbina protótipo (IEC 60609).

As garantias de cavitação, previstas nas Especificações Técnicas para a turbina modelo foram atendidas, conforme apresentadas na Tabela 02.

TABELA 02 – Margem de segurança da cavitação para a turbina modelo ( $\sigma_p / \sigma_{standard}$ ).

Ponto de operação	Queda líquida (m)	Potência de saída (MW)	Ângulo da pá (°)	Elevação na extremidade inferior da pá - ZB (m)	Sigma mínimo da instalação $\sigma_p$ em ZB	$\sigma_{standard}$ em ZB	$\sigma_p / \sigma_{standard}$
1	21.40	3.84	8.99	8.67	0.523	0.114	4.59
2	21.40	12.80	28.66	8.51	0.531	0.452	1.17
3	20.50	12.80	30.02	8.50	0.637	0.505	1.26
4	20.40	12.80	30.17	8.50	0.641	0.512	1.25
5	19.40	12.70	30.10	8.50	0.676	0.529	1.28
6	18.40	12.02	30.17	8.50	0.713	0.553	1.29
7	17.40	11.45	30.39	8.50	0.754	0.589	1.28
8	17.40	3.84	11.48	8.65	0.745	0.144	5.16

Estes resultados foram obtidos por analogia das curvas de sigma break do modelo de referência, aplicado para as condições operacionais da turbina de Curuá-Una, ou seja, todos os pontos da faixa de operação de Curuá-Una, a razão  $\sigma_p / \sigma_{standard}$  superou a razão garantida 1,15.

As garantias de cavitação para a turbina protótipo será aferida com 8000 horas de operação conforme IEC 60609, considerando a seguinte equação:

$$PMR \leq 0,11 * D^2$$

Onde:

- PMR é o material perdido pelo rotor da turbina devido a erosão de cavitação, em gramas por hora de operação (8,45 kg em 8000 horas);
- D é o diâmetro do rotor da turbina em metros.

Esta garantia está associada que as perfurações dos pittings sejam inferiores a 8 mm.

A Tabela 03 a seguir apresenta os resultados dos rendimentos garantidos para a turbina e obtidos da transposição do modelo reduzido de referência para as turbinas modelo e protótipo, conforme norma IEC 60193:

TABELA 03 – Resultados dos Rendimentos Médios Ponderados Obtidos por Transposição.

Rendimento Médio Ponderado	Turbina Modelo	Turbina Protótipo
Contratual	-	94,00
Garantido na Proposta	92,32	94,31
Obtido por Transposição	92,46	94,46

As flutuações de pressão e de torque, também apresentaram valores inferiores aos contratuais, ou seja, um máximo de 1,24% pico FFT.

#### 4.0 CONCLUSÕES

- O Relatório de ensaio de modelo reduzido transposto com a utilização de simulações numéricas e de modelo de referência já ensaiado em laboratório, considerando as normas técnicas aplicáveis, apresentou resultados que atenderam as garantias contratuais para a turbina protótipo, além da redução de custo e de tempo de projeto;
- O rendimento médio ponderado obtido pela transposição superou ao valor contratual;
- O block out de concreto e o afogamento, existentes limitaram o avanço tecnológico da turbina, entretanto, os rendimentos obtidos e as perdas de cargas são compatíveis para este porte de turbinas Kaplans da atualidade;
- A erosão por cavitação e a estabilidade hidráulica serão aferidas com maior precisão nos ensaios de comissionamento e durante o período de garantia, da turbina protótipo;

- A evolução da aplicabilidade da dinâmica dos fluidos computacional, dos softwares e da capacidade dos computadores, indicam tendências da realização de modelos simulados e transpostos numericamente, para turbinas hidráulicas de médio porte, entretanto, o limite de sua aplicação ainda não está muito bem definido e depende do tamanho da unidade, do quão avançada deverá ser a turbina, do fator de risco e do número de unidades. Tema que merece discussão e debate técnico.

## 5.0 REFERÊNCIAS

- Especificação Técnica - CRU-E-CAF-201-0001-ET – Turbina e Regulador de Velocidade – Eletrobras Eletronorte – 2019;
- Relatório Transposto de Modelo / Transposition Modelo Report - CRU.UG4-E-CAF-113-RT-001-R0 – Turbina Kaplan de 12,755 MW – 20,5 mca – 200 rpm, da Usina Hidrelétrica de Curuá-Una – CCU – Consórcio Curuá-Una – GE/Sistechne – 2020;
- International Electrotechnical Commission - Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests – IEC – 60193-1999.

International Electrotechnical Commission - - Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Cavitation pitting evaluation IEC – 60609-2004



## DADOS BIOGRÁFICOS



CARMO GONÇALVES – Eng. Mecânico pela Universidade de Brasília – UnB - 1984, Mestrado em Enga. Mecânica (Mecânica dos Fluidos – Cavitação) – UnB – INPG – 1997 – Ex Professor das Engenharias do UniCEUB e da UnB, pós graduação lato sensu pela Universidade Federal de Santa Catarina - 2007. Atualmente estou gerente do Departamento de Engenharia Eletromecânica, da Superintendência de Geração da Eletrobras Eletronorte – mais de 30 anos de experiência na área de projeto e construção eletromecânica de hidrelétricas, principalmente na área de máquinas hidráulicas.

(2) RICARDO DA SILVA RIBEIRO. - Formação Acadêmica: Engenheiro Mecânico - Universidade de Brasília (2004). Mestrado Ciência Mecânica - Universidade de Brasília (2007). Engenheiro Civil – UDF (2017). Atividade Profissional: Engenheiro de Projeto de Turbinas hidráulicas – Eletronorte (2007-2021).

(3) ANGELO TORRES MADUREIRA Engo. Mecânico pela Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 2006. Mestrando em Engenharia de Infraestrutura e desenvolvimento energético pela U.F.P.A – Trabalhou como engenheiro e técnico industrial nas empresas FIAT Automóveis S/A , LIDER Aviação e Valourec Mannesmann. Atualmente é Engenheiro do Departamento de gestão da manutenção da geração hidráulica da Eletrobras Eletronorte – 15 anos de experiência em projetos de sistemas mecânicos e eletromecânicos industriais e de geração hidráulica. Atualmente, trabalha com sistemas de monitoramento de vibrações, microdeformações, análise estrutural e dinâmica de hidrogeradores e circuitos hidráulicos industriais.

(4) CID ANTUNES HORTA Currículo resumido: Cid Antunes Horta, Engenheiro Mecânico pela Universidade federal de Itajubá – UNIFEI- 1975- Mestrado em Engenharia Mecânica (Mecânica dos Fluidos – Instabilidade Hidráulica) – UNB -2005 . Participou na implantação das usinas hidrelétricas de São Simão e Emborcação (CEMIG), das Usinas Hidrelétricas de Tucuruí, Balbina, Samuel, Coaracy Nunes e Curua Una e das Usinas Térmicas de Santana e Rio Acre (ELETRONORTE) e das Usinas Hidrelétricas Dardanelos, Belo Monte e Sinop(SPE com participação Eletronorte). Atualmente Engenheiro de Projeto e Construção da Gerência de Projetos Eletromecânicos de Geração. Mais de 45 anos de experiência na área de construção e projetos Eletromecânicos de Geração.

(5) KARINE RIBEIRO DO VALE ALMEIDA PAIOTTI -Eng. Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI - 1997. Mais de 20 anos de experiência em usinas hidrelétricas como engenheira de turbinas hidráulicas na área de propostas técnicas e também na execução de projetos de turbinas. Autalmente como Líder de Engenharia Regional da GE Energias Renováveis (Hydro) - LATAM e como PEM ("Project Engineer Manager") para o projeto de Curuá Una.

(6) ARNAUD BONI graduated in 2012 from Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE-SUPAERO) in Toulouse, France, specialized in Fluid Mechanics.I joined the Bulb and Kaplan hydraulic design team in GE Renewable Energy - Hydro Solutions the same year. My roles are going from designing hydraulic components (semi-spiral case, guide vanes, runner...) for new and refurbishment projects to research and developments on innovative designs, methods and softwares.