



XVI SNPTEE
Seminário Nacional de Produção e
Transmissão de Energia Elétrica

GGH/022

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

**MODELO REDUZIDO TRANSPOSTO NUMERICAMENTE PARA O DIMENSIONAMENTO
DA TERCEIRA UNIDADE GERADORA (TURBINA HIDRÁULICA) PARA UHE COARACY
NUNES**

Cid Antunes Horta
ELETRONORTE

Luiz Gabelini
VOITH HYDRO

Carmo Gonçalves*
ELETRONORTE

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar os motivos que levaram a ELETRONORTE substituir os ensaios de modelo reduzido da turbina, testemunhados por ensaios transpostos numericamente de um modelo homotético.

O artigo apresenta também os resultados obtidos com a transposição numérica de um modelo semelhante, que foram os valores garantidos contratualmente pelo fornecedor (VOITH HYDRO), e os valores obtidos no Index Test do protótipo, alguns aspectos relevantes da transposição tais como os problemas surgidos devido as não homologias, a redução da eficiência da turbina e o deslocamento da curva de colina, os traçados diferentes e a redução dos custos.

A hidráulicidade do rio também foi um fator determinante nesta tomada de decisão.

PALAVRAS-CHAVE:

Turbina Kaplan - Coaracy Nunes - Evolução Tecnológica - Transposição – Modelo Reduzido

1.0 - INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos direcionados para a construção de uma Usina Hidrelétrica no Rio Araguari, nas imediações da Cachoeira do Paredão, no Estado do Amapá, são da década de 50.

Estes estudos avançaram de forma intermitente, no decorrer das décadas de 50 e 60, até que em 27 de dezembro de 1967, foi aprovado o relatório de ensaio do modelo em escala reduzida, com testes pontuais, sem levantamento de curva de colina, para a aquisição de duas turbinas Kaplan de eixo vertical de 20 MW cada, para queda de 23,0 m. A ELETRONORTE assumiu oficialmente as responsabilidades da usina, em fase inicial de construção, no início da década de 70.

Sob a responsabilidade da ELETRONORTE, as obras foram concluídas em 1975, abrangendo o sistema de geração e transmissão. Neste mesmo ano as duas unidades geradoras foram colocadas em operação comercial, e já prevendo o crescimento da demanda e considerando a hidrologia do Rio Araguari, foi deixado pronto, um bloco de concreto de primeiro estágio com as mesmas dimensões dos blocos das unidades em operação, para que, no futuro, fosse instalada mais uma unidade geradora e que operasse em conjunto com o parque térmico de Macapá, passando a ser um sistema hidrotérmico isolado.

A expansão crescente e contínua do consumo de energia elétrica no Estado do Amapá, da ordem de 10,5% ao ano, levou a ELETRONORTE a concentrar esforços na atualização e otimização dos seus projetos, visando ponderar o custo da elevação de potência com o custo da energia gerada por fonte de geração térmica com ressarcimento parcial do custo do combustível.

Em 07/05/1997, a ELETRONORTE assinou um contrato em regime turn-key, para o fornecimento de uma unidade hidrogeradora dotada de turbina Kaplan, visando aproveitar da melhor forma possível o referido recesso de concreto.

A contratada, o consórcio COANES liderado pela VOITH HYDRO, apresentou em sua proposta um ensaio de modelo reduzido testemunhado em seu laboratório na Alemanha.

Considerando que o fornecedor possuía em seu acervo técnico, projetos de turbinas semelhantes, o estágio atual de evolução de software para o dimensionamento de turbinas hidráulicas, a existência de um modelo homotético, a redução de custos em US\$ 478,000.00 (quatrocentos e setenta e oito mil dólares americanos), a engenharia de projeto eletromecânico da ELETRONORTE decidiu substituir os ensaios testemunhados contratuais pelos ensaios transpostos com simulações numérica.

Este trabalho apresenta a comparação dos valores garantidos contratuais para o modelo e protótipo, obtidos por transposição com auxílio de simulações numéricas, para a turbina hidráulica, com os valores obtidos no “index test” do protótipo no campo.

Também são apresentadas, as dificuldades surgidas das medições nos testes de campo, principalmente relativa à eficiência da turbina e medições de vazão.

A adoção destas filosofias de projeto, possibilitou a ELETRONORTE atingir os níveis de potência e estabilidade da unidade, garantidos contratualmente.

Espera-se que os resultados obtidos, contribuam como referências para outros projetos.

2.0 – PARÂMETROS RESTRITIVOS IMPOSTOS À TERCEIRA UNIDADE E FILOSOFIAS DE PROJETO

O bloco de concreto de primeiro estágio existente foi um parâmetro restritivo na definição e limitação de determinadas dimensões, e um fato que foi contornado na transposição do modelo reduzido e níveis importantes tais como:

- Nível máximo normal de montante 120,00m
- Nível mínimo normal de montante 113,00m
- Nível mínimo normal de jusante 96,60m
- Dimensões das Grades da Tomada D’água
- Dimensões da Comporta vagão da Tomada D’água
- Dimensões da Comporta Ensecadeira da Tomada D’água
- Dimensões Máximas da Caixa Semi-Espiral
- Elevação Inferior do Tubo de Sucção (83,00 m)

Também foi considerado para o dimensionamento da 3a. Unidade, a nova curva chave do canal de Fuga, $Q = 134,151 \cdot (H-95,8)^{1,259938}$, e os fatores de ponderância das quedas líquidas que são apresentados na Tabela 1, abaixo:

TABELA 1 - QUADRO DEMONSTRATIVO DE QUEDAS E FATORES DE PONDERÂNCIA

QUEDAS LÍQUIDAS (m)	FATOR DE PONDERÂNCIA (%)
22,8	15
21,9	80
18,7	5

As principais filosofias adotadas para a aceitação do modelo transposto numericamente para o dimensionamento da turbina Kaplan da 3ª Unidade Geradora foram as abaixo discriminadas:

- Apresentar um relatório dos ensaios do modelo reduzido da turbina semelhante obtido dos ensaios no laboratório, com as curvas de colina e de conjugação, com os dimensionais do modelo original, com todos os demais dados do modelo ensaiado, tais como os resultados de cavitação,

disparo, e os dados da bancada, tais como instrumentação, curvas de calibração e o seu erro médio total, para análise e aprovação da ELETRONORTE.

- Os rendimentos do Modelo hidráulico deverão ser convertidos para as condições do Protótipo utilizando a fórmula abaixo, que é uma composição das IECs publicações 193 e 497, assumindo o expoente 0,16 no lugar de 0,2, que é um valor médio melhor para o range de número de Reynolds coberto por turbinas hidráulicas, conforme especificado na IEC-995 de 1991.

$$\Delta\eta = (1 - \eta_{om}) 0.8 \left[1 - \left(\frac{R_{eym}}{R_{eyp}} \right)^{0,16} \right]$$

onde:

$\Delta\eta$ = Incremento Constante de Majoração Rendimento

η_{om} =Rendimento Ótimo do Modelo

R_{eym} =Número de Reynolds do Modelo

R_{eyp} =Número de Reynolds do Protótipo

- Apresentar todas as não homologias e equacionar as diferenças de eficiência em virtude destas diferenças, bem como as suas implicações;
- A hidraulicidade do rio Araguari, que verte durante 9 meses por ano, e o fato da usina ser a fio d’água;
- A redução de custo, com a retirada dos ensaios de modelo reduzido testemunhados;
- O avanço dos softwares de dinâmica dos fluidos, tais como “TASC FLOW”;
- Manter todas as penalidades contratuais;
- Enviar os resultados dos cálculos computacionais, para as distribuições de velocidade e pressões no circuito hidráulico de geração;
- Realizar mais de um “index test”, se necessário, para o ajuste da unidade no campo.

Considerando o exposto, a ELETRONORTE elaborou um adendo contratual, onde ficou estabelecido que os ensaios de modelo reduzido previstos em laboratório seriam substituídos, por outro relatório transposto de um modelo semelhante.

3.0 RESULTADOS OBTIDOS NO MODELO TRANSPOSTO NUMERICAMENTE

Os resultados apresentados foram obtidos com a utilização das leis de semelhanças, baseando-se na norma IEC - 193 “ International Code For Model Acceptance Tests of Hydraulic Turbines”, e no modelo computacional de dinâmica dos fluidos, considerando as diferenças de geometrias entre modelo e protótipo. O modelo considerado apresenta as seguintes características:

- Diâmetro de saída do rotor de 340 mm;
- Rotação de 1500 rpm;
- Quedas de 10 a 13 m.c.a.

Todas as passagens hidráulicas do modelo escolhido são semelhantes ao protótipo, exceto, a caixa semi-espiral e tubo de sucção, cujas principais não homologias, corresponderam a uma diferença de área de entrada da caixa espiral, em torno de 35% menor, e o tubo de sucção com menor profundidade e com menor área de saída, a cerca de 16,5 % menor, estas reduções encontram-se esquematizadas na figura 1 em anexo.

Estas não homologias culminaram com uma redução da eficiência global da unidade de 0,52%, para o ponto ótimo de projeto, sendo que as perdas para os outros pontos operacionais foram estimadas pela expressão abaixo:

$$\Delta\eta = -0,6 * (Q_{11}/Q_{11opt})^2 \quad (1)$$

onde:

$$Q_{11} = \left(\frac{Q}{\left(\frac{D}{1,03} \right)^2 * \sqrt[3]{H}} \right) \quad (2)$$

Onde:

Q_{11} = vazão unitária em m³/s

Q = vazão do protótipo em m³/s

D = diâmetro de saída do rotor da turbina em m

H = queda em m.c.a

Q_{11opt} = vazão unitária para o ponto ótimo

O índice -0,6 foi utilizado substituindo o -0,52%, por questão de segurança nos cálculos.

Como as eficiências obtidas pelos ensaios do modelo semelhante quando transpostas para protótipo eram superiores ao garantido, foi possível efetuar as reduções de rendimento sem prejudicar os valores garantidos contratualmente.

Foi apresentado um protótipo com as seguintes características técnicas e valores garantidos:

- Diâmetro de saída do rotor da turbina: 4600 mm;
- Turbina avançada tecnologicamente como pode ser visto na Tabela 4 no anexo;
- Número de pás do rotor de 5 e o número de palhetas diretrizes 24;
- Rotação 150 rpm;
- Potência Média Ponderada de 29.423 kW;
- Rendimento Médio Ponderado de 93,63 %

Tabela 2 – Valores Garantidos Contratualmente

QUEDA (m.c.a)	POTÊNCIA (kW)	EFICIÊNCIA (%)
22,8	30.730	93,65
21,9	29460	93,50
18,7	24920	92,60

TABELA 3 – VALORES OBTIDOS PELO MODELO TRANSPOSTO

QUEDA (m.c.a)	POTÊNCIA (kW)	EFICIÊNCIA (%)
22,8	30.730	93,85
21,9	29460	93,65
18,7	24920	92,60

Os resultados apresentados na tabela 3 já consideraram as perdas devido as não homologias.

Nas curvas de colinas apresentadas, observou-se o deslocamento da região ótima da mesma da faixa normal garantida para a operação contínua, em virtude do acréscimo de perdas.

A estabilidade da unidade e cavitação foi verificado de forma estimada através da distribuição de velocidade que pode ser vista na figura 2 em anexo, entretanto as condições operacionais da terceira unidade da UHE Coaracy Nunes, se enquadraram dentro do range operacional já previsto e garantido no modelo semelhante.

Todos os valores garantidos consideraram o limite de cavitação estabelecido pelas especificações técnicas da ELETRONORTE, ou seja, a relação do sigma crítico pelo sigma da instalação de 1,2.

4.0 RESULTADOS OBTIDOS NO INDEX TEST

O index test foi executado pela VOITH/SIEMENS com acompanhamento da ELETRONORTE, conforme previsto contratualmente.

Como não foi instalado um medidor de vazão ultrassônico, a aferição da eficiência foi prejudicada, uma vez, que utilizamos o sistema Winter Kennedy, que apresenta erros substanciais para este tipo de verificação.

Nos testes realizados foram dadas especiais atenções nos seguintes resultados:

- Pulsações de pressões na entrada da caixa semi-espiral, no tubo de sucção e na tampa da turbina;
- Deflexão na tampa da turbina, durante as rejeições de carga (7 MW, 14 MW, 21 MW e 28 MW);
- Curvas de conjugação do distribuidor e pás rotoras;
- Potências na saída do gerador, aberturas do distribuidor;
- Vibrações/oscilações nos mancais e no eixo;
- Sobrevelocidade;
- Parada de emergência.

Outro problema que foi deparado foi a inviabilidade de variar a queda para realizar os testes em todas as quedas ponderadas, sendo portanto que o teste foi realizado pela queda líquida nominal de 21,90 mc.a, que é a mais importante uma vez que apresenta um fator de ponderação de 80%.

Para a queda líquida testada a unidade apresentou uma

potência na saída do gerador de 31 MW, o que corresponde a uma potência no eixo da turbina de 31,6 MW, o que corresponde a 0,28 MW superior ao valor limite extremo operacional garantido pelo FORNECEDOR, para uma relação do sigma da instalação para o sigma crítico de 1,1; e 2,14 MW superior ao valor garantido para a relação de sigmas contratual, que atenderam as especificações técnicas da ELETRONORTE.

A eficiência garantida para esta condição operacional foi verificada de forma aproximada, plotando na curva de colina do protótipo, o ponto com as coordenadas de abertura do distribuidor, e potência do eixo da turbina e foi observado que a eficiência encontrada estava 0,5 % acima do valor garantido contratualmente, e 0,35% do valor obtido pela transposição do modelo.

Após ajustes dos mancais, oscilogramas obtidos mostraram que as oscilações do eixo, bem como as vibrações dos mancais, atenderam as especificações técnicas da ELETRONORTE e aos valores garantidos contratualmente.

Para confirmação dos valores garantidos para as quedas de ponderações inferiores, serão realizados outros index test em época oportuna, principalmente para a queda de 22,8 m.c.a, que possui uma ponderação de 15%.

Com relação à cavitação, e a unidade será parada com 8000 horas de operação, quando serão efetuados os reparos necessários, e os eletrodos pesados, para verificarmos se a garantia foi atendida, entretanto, não se ouviu ruídos característicos deste fenômeno.

5.0 – SUGESTÕES

Da experiência adquirida com o fornecimento da terceira unidade da UHE COARACY NUNES, sem a realização de ensaios de modelo reduzido testemunhado em laboratório, observou-se o que já estava previsto, ou seja, que a grande dificuldade no campo é medir a eficiência com precisão para a sua comprovação, portanto sugere-se, além do já mencionado neste trabalho, instalar nas unidades com processo de aquisição e projeto similar a este, um sistema de medição de vazão por ultra-som, o que irá aumentar a precisão desta medição e garantir uma checagem desta grandeza com maior confiabilidade.

Quando for efetuar a aquisição de uma unidade que permita a realização de transposição numérica de modelos homólogos é extremamente importante, estabelecer todos os parâmetros que deverá conter o relatório transposto, bem como acesso aos softwares utilizados e aos seus resultados.

6.0 CONCLUSÕES

- O relatório transposto por métodos numéricos, e pelas equações de semelhanças, apresentou uma coerência com o index test realizado, principalmente com relação a potência garantida e estabilidade da unidade para a queda de maior frequência ensaiada;
- A redução da eficiência de 0,52 %, devido as não homologias entre o modelo usado e o protótipo, em virtude do bloco de concreto já existente que impôs limitações a caixa semi-espiral e ao tubo de sucção, será menor, para turbinas novas que poderão ser totalmente homólogas, transposta numericamente, o que é um bom indício de validação dos ensaios transpostos numericamente, para turbinas Kaplan deste porte;
- A transposição numérica, aparentemente não minimiza a evolução tecnológica da unidade, uma vez que esta turbina Kaplan, apresenta um Ns de 562 (kW-m), e um coeficiente de evolução tecnológica de 2634;
- Esta redução de eficiência para o caso de Coaracy Nunes é muito pouco expressiva em virtude de existir água em abundância em 9 (nove) meses do ano, o que garantiu a economia à ELETRONORTE de mais de US\$ 450,000.00 (quatrocentos e cinquenta mil dólares americanos), com a eliminação dos ensaios testemunhados;
- A evolução da dinâmica dos fluidos computacional, com softwares tais com o Tasc Flow, associada a evolução dos softwares estruturais, tipo Nastran, indicam uma tendência da realização de modelos simulados numericamente para turbinas hidráulicas de médio porte, entretanto o limite de sua aplicação ainda não está muito bem claro, e depende do tamanho da unidade, bem como do seu tamanho.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Voith Hydro**, “Model Test Kaplan Turbine K187/5 – Report 4745”, November, 1995.
2. **EPFL** – “Numerical Flow Simulation”, March, 2000
3. **EPFL** – “Numerical Evaluation of the Performance of Hydraulic Machinery”, July, 1999.

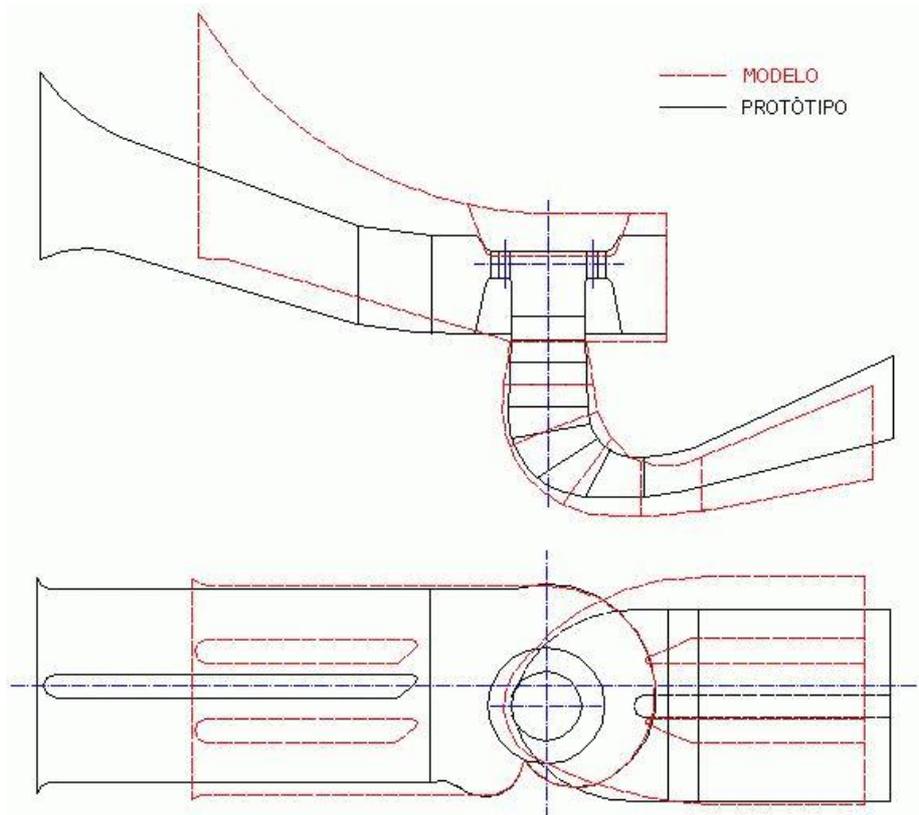


FIGURA 1 – PARTES NÃO HOMOLOGAS

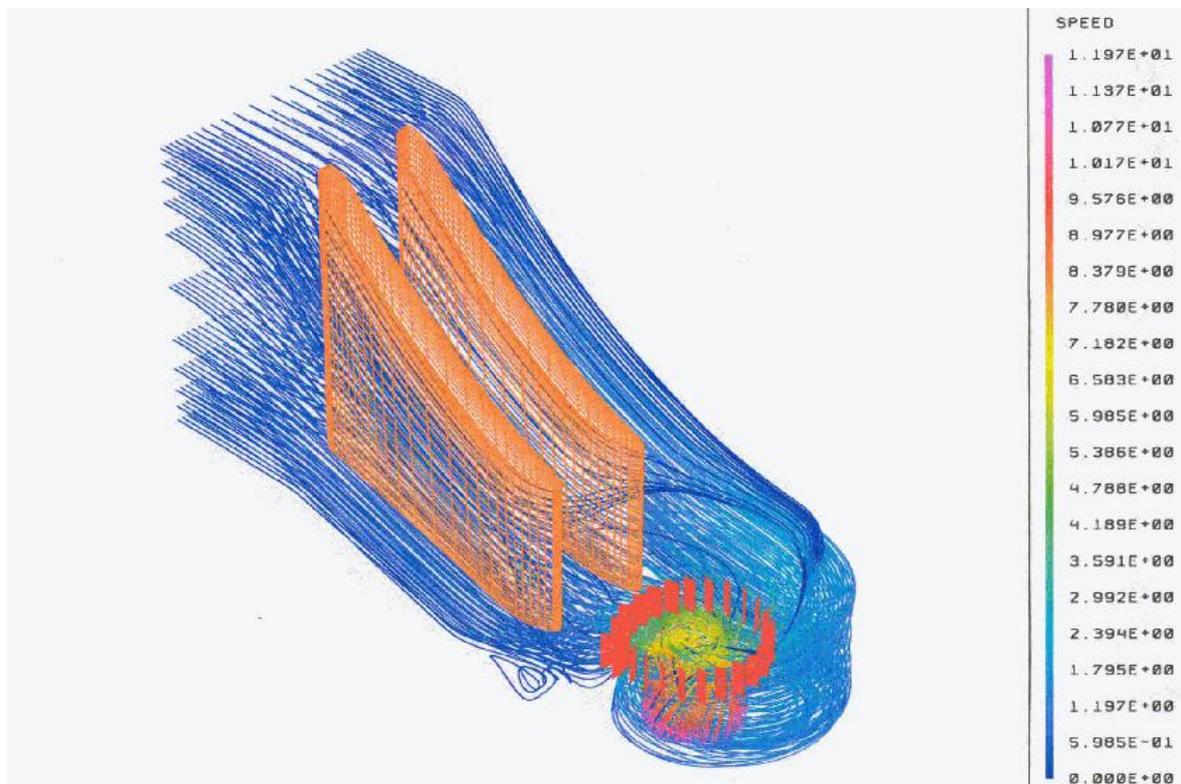


FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE

TABELA 4 - PRINCIPAIS PARÂMETROS DE TURBINAS SEMELHANTES

ITEM	USINA	FABRICANTE	QUEDA	ROTAÇÃO	POTÊNCIA	K	ANO
00	C. NUNES	VOITH HYDRO	21,90	150	31,6	2634	2000
01	C. NUNES	HITACHI	23,00	138,5	20,00	1865	1967
02	KATAKADO	HITACHI	20,00	125,00	22,5	1983	1970
03	MACÁGUA II	HITACHI	23,0	94,7	88,2	2678	1993
04	HUDSON	KVAERNER	21,00	163,6	22,4	2496	1992
05	GRAYFOSS	KVAERNER	19,1	142,9	30,2	2719	1993
06	VERBOIS	HYDRO VEVEY	21,0	136,4	24,3	2168	1987
07	FEISTRITZ	HYDRO VEVEY	23,0	136,4	44,1	2727	1990
08	ZILINA	HYDRO VEVEY	25,8	150,0	38,1	2558	1994
09	MIMOSO	VOITH	23,8	163,30	20,0	2143	1972
10	HONEFOSS II	VOITH	21,0	166,70	22,7	2560	1975
11	TAQUARUÇU	VOITH	21,9	85,70	103,0	2717	1980
12	BALBINA	MEP	21,72	105,88	51,5	2388	1981