



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

GGH - 07
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRULICA – GGH - 126**

**MODELO REDUZIDO PARA DEFINIÇÃO DO PROJETO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS PARA A
EXPANSÃO DA UHE TUCURUI**

**Carmo Gonçalves*
ELETRONORTE**

**Wandyr de Oliveira Ferreira
ELETRONORTE**

**Cid Antunes Horta
ELETRONORTE**

**Marlos Fabiano Moraes
ELETRONORTE**

**Erico Cardoso Quintans
ELETRONORTE**

**Jean Luis Quenin
ALSTOM**

RESUMO

Este trabalho tem por principal objetivo apresentar os resultados dos ensaios de modelo reduzido testemunhado para as novas turbinas hidráulicas da expansão da UHE TUCURUI, como: bancada de teste, rendimento médio ponderado, cavitação, flutuação de pressão e cheque dimensional, e confrontá-los com os garantidos.

Ele apresenta também a comparação entre valores obtidos nos ensaios de modelo reduzido e valores obtidos nos ensaios de campo do protótipo.

Este trabalho pretende contribuir para iniciarmos uma discussão no setor elétrico e com os principais fornecedores mundiais de turbinas hidráulicas sobre estabelecer critérios e limites para flutuações de pressões entre modelo e protótipo.

PALAVRAS-CHAVE

Turbinas Hidráulicas - Modelo Reduzido - Tucuruí II - Otimização - Ensaios de Protótipo.

1.0 - INTRODUÇÃO

1.1 A Usina

A UHE Tucuruí, está situada no rio Tocantins, no Estado do Pará aproximadamente 300 km de Belém, e pertence à Eletronorte.

A Eletronorte assumiu a responsabilidade dos estudos de inventário do rio Tocantins e da viabilidade da UHE Tucuruí em 20/06/1973, na época de sua criação, a qual foi inaugurada em 22/11/1984.

Para o dimensionamento das Turbinas Hidráulicas da primeira etapa foram considerados os seguintes parâmetros:

- Nível máximo do reservatório: 74,00 m;
- Nível máximo normal do reservatório: 72,00 m;
- Nível mínimo normal do reservatório: 58,00 m;
- Nível mínimo excepcional: 51,60 m;
- Variação nível jusante: 3,96 a 24,50 m;
- Perdas estimadas: 1,00 m;
- Queda mínima normal líquida: 51,40 m;
- Queda mínima de operação: 45,00 m.

*SCN Qd. 06 Conj. A, Bloco B, sala 1102 - CEP: 70810-900 - Brasília, DF - E-mail: cgoncalves@eln.gov.br

O dimensionamento levou a instalação de 12 unidades geradoras principais conforme características descritas no item 3.

Também foram instaladas duas unidades auxiliares com queda nominal de 60,80 m, rotação de 327,27 rpm e potência nominal no eixo da turbina de 20,5 MW.

1.2 A Expansão da Usina

A segunda etapa abrangerá a construção de uma nova Casa de Força, no prolongamento da existente, para abrigar onze unidades conforme características descritas no item 3.

A expansão da Casa de Força da UHE Tucuruí possibilitará o aumento do fornecimento de energia para os sistemas elétricos Norte-Nordeste e Sul-Sudeste-Centro-Oeste, o que trará grandes benefícios ao País em virtudes de fluxos energéticos sazonais, devido a diversidade hidrológica das regiões, o que proporcionará uma operação otimizada dos reservatórios das usinas. Após a realização dos estudos hidrotécnicos e das simulações energéticas, foram definidos os seguintes parâmetros abaixo discriminados, necessários para a definição e otimização dos equipamentos eletromecânicos:

- Queda mínima normal líquida: 51,40 m;
- Potência final a instalar - 4125 MW;
- Potência nominal da turbina nos bornes do gerador - 395 MVA;
- Queda de referência das turbinas - 61,7 m;
- Curva chave do canal de fuga;
- Máxima depleção do reservatório;
- Número de unidades a instalar 11.

O projeto emvidou esforços no sentido de manter a elevação do piso do gerador, para evitar degraus entre as duas Casa de Força, o que também alteraria o curso do gancho da ponte rolante e dificultaria a utilização da área de montagem existente.

A experiência adquirida da operação das unidades existentes, somada aos estudos realizados para a expansão da UHE Tucuruí, possibilitou a realização de um arranjo mais econômico para a configuração complementar, onde foram possíveis otimizações significativas na concepção dos equipamentos eletromecânicos.

Para chegar à alternativa de motorização selecionada, foram realizados estudos de alternativas, com 8, 9, 10, 11 e 12 unidades, com rotações síncronas variando de 78,26 à 85,72 rpm e diferentes níveis de potências.

Após os estudos realizados, definiu-se como a alternativa mais atrativa, e que apresentou o melhor custo benefício, a de 11 unidades geradoras com potência ativa unitária de 375 MW.

Foi definida como queda de referência da turbina 61,7m; para qual a turbina fornecerá uma potência de 382 MW em seu eixo.

2.0 - OTIMIZAÇÕES INCORPORADAS NA MOTORIZAÇÃO DAS UNIDADES DE 13 A 23 (EXPANSÃO)

A construção, montagem e operação das unidades existentes (grupos de 1 a 12), permitiram incorporar otimizações de vulto na concepção dos equipamentos eletromecânicos para a 2ª etapa (Expansão), cujas principais fatores são:

- A atualização do estado da arte das turbinas hidráulicas;
- O projeto de um perfil mais esbelto para os condutos forçados, o que eliminou uma das curvas existente no Conduto anterior reduzindo o volume de concreto e diminuindo o comprimento do conduto em 4,0 m, que em virtude do incremento da vazão, teve seu diâmetro aumentado em 1,0m;
- Reposicionamento da soleira da tomada d'água, cuja cota foi da elevação 27,00 para a elevação 34,67 m, isto devido à redução da depleção, o que possibilitou o redimensionamento das comportas, comportas ensecadeiras, dispositivos de movimentação, para carregamentos menores, e a redução de concreto estrutural;
- Adoção de tomadas d'água, para água de resfriamento, independente para cada unidade, em níveis mais elevados, favorecendo os sistemas de arrefecimento.

3.0 - COMPARAÇÃO DAS UNIDADES NOVAS COM AS UNIDADES EXISTENTES

Todas as novas unidades da UHE Tucuruí passarão a operar nas condições de nível máximo do reservatório na elevação de 72,00 m e com máxima depleção operativa de 10 m, sendo, portanto o nível mínimo do reservatório a elevação de 62,00 m.

Somente para as unidades novas a cota do nível mínimo do canal de fuga, o que define o afogamento mínimo da turbina, corresponde a 5,00 m e ocorrerá com frequência inferior a 6%.

No caso das unidades novas, o posicionamento da turbina, em relação ao nível mínimo de jusante, não foi determinado pelas condições críticas de cavitação do seu rotor, e sim para acomodar uma unidade de dimensões ligeiramente superior e manter a elevação do piso do Gerador na elevação 11,20. Esta modificação não onerou a obra uma vez que boa parte das escavações já se encontram prontas e houve um ganho de potência e aproveitamento de equipamentos existentes. Com a finalidade de poder comparar os principais parâmetros das unidades existentes, com as unidades novas, apresentam-se a seguir as Tabelas 1 e 2.

TABELA 1- Dados Comparativos das Turbinas da UHE Tucuruí.

ITEM	DESCRIÇÃO	UNID.	TURBINAS EXISTENTES	TURBINAS NOVAS
01	Potência (Sob H = 61,7m)	MW	325	382 (Nominal)
02	Potência (Sob H = 64,5 m)	MW	355	401 (Máxima)
03	Vazão Sob (H = 61,7)	m ³ /s	580	682
04	Diâmetro do Rotor	mm	8150	8300
05	Peso do Rotor	T	232	270
06	Peso Total da Turbina	T	1650	1760
07	Rotação Síncrona	Rpm	81,82	81,82
08	Linha de Centro da Roda	m	-0,80	-1.50
09	Rendimento Máximo	%	96 (Moody)	96 (Reynolds)
10	Coefficiente de Evol. Tecnológica	-	2118	2297

TABELA 2- Dados Comparativos dos Geradores da UHE Tucuruí.

ITEM	DESCRIÇÃO	UNID.	GERADORES EXISTENTES	GERADORES NOVOS
01	Potência Nominal	MVA	350	395
02	Tensão	KV	13,8	13,8
03	Diâmetro do Rotor	mm	15775	16500
04	Peso do Rotor	T	920	965
05	Peso Total	T	1586	1908
06	Rotação Síncrona	Rpm	81,82	81,82
07	Fator de Potência	-	0,95	0,95

4.0 - DATA E LOCAL DA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios de modelo de Tucuruí II foram realizados na ALSTOM Power Hydro – na cidade de Grenoble na data de 20 a 30 de Novembro de 2000. Os testes foram testemunhados pela Contratante, segundo as recomendações usuais de ensaios de modelo realizados anteriormente.

4.1 Características garantidas

O ensaio visou mostrar que as características requeridas pelas especificações de compra seriam atendidas pela máquina que estava sendo adquirida.

O ensaio de modelo reduzido serviu, portanto, para comprovação legal de que a unidade a ser montada na expansão de Tucuruí atenderia às expectativas da empresa, bem como aos critérios da licitação de compra do equipamento.

Assim, este trabalho apresenta os resultados dos ensaios de modelo reduzido testemunhado das novas turbinas hidráulicas da expansão da UHE Tucuruí, tais como: bancada de teste, rendimento médio ponderado, cavitação, flutuação de pressão e cheque dimensional, e confrontar os resultados obtidos com os garantidos contratualmente.

Este trabalho também pretende contribuir para iniciarmos uma discussão no setor elétrico e com os principais fornecedores mundiais de turbinas hidráulicas sobre estabelecer critérios e limites para flutuações de pressões entre modelo e protótipo.

4.2 Bancada de Testes e Calibração da Bancada

A bancada de testes utilizada está localizada no laboratório de ensaios de modelo reduzido, na sede da empresa fornecedora, em Grenoble na França. A previsão de erro máximo associado a esta bancada, é de $\pm 0,22\%$, com a somatória de todos os erros da bancada.

Os testes foram iniciados pela calibração de todos os instrumentos e da bancada.

Antes dos testes preliminares, a calibração dos equipamentos de medição foi realizada pelo laboratório. Os procedimentos da calibração são explicados no capítulo 2 do relatório TEST RIG T5 do Turbine Model Test (10) para turbinas Francis e Kaplan.

4.3 Resultados Obtidos da Calibração (Σ erros)

As discrepâncias em medição consistem em erros sistemáticos devido à calibração dos instrumentos da plataforma e de erros aleatórios devido aos instrumentos de medição elétricos.

Pode-se calcular a discrepância da medição da eficiência. Por exemplo, no ponto de ensaio nº103 temos $n=1104,6$ rpm, $H=20,05$ mca, $Q=599,47$ l/s, $\eta=93,56\%$. As discrepâncias individuais são as seguintes:

- Na vazão: $f_Q = \pm 12 \cdot 10^{-4}$
 Erro sistemático = $\pm 6 \cdot 10^{-4}$
 Erro aleatório = $\pm 6 \cdot 10^{-4}$
- Na queda: $f_H = \pm 17,2 \cdot 10^{-4}$
 Erro sistemático = $\pm 7,2 \cdot 10^{-4}$
 Erro aleatório = $\pm 10 \cdot 10^{-4}$
- No torque: $f_C = \pm 5 \cdot 10^{-4}$
 Erro sistemático = $\pm 3,2 \cdot 10^{-4}$
 Erro aleatório = $\pm 1,8 \cdot 10^{-4}$
- Na velocidade: $f_n = \pm 0,1 \cdot 10^{-4}$ (Erro aleatório)
- Na densidade d'água: $f_\rho = \pm 0,4 \cdot 10^{-4}$ (Erro aleatório)

A discrepância, f_η , da eficiência é calculada a partir das incertezas individuais, utilizando a seguinte expressão (intervalo de confiança de 95%):

$$f_\eta = \frac{\Delta\eta}{\eta} = \pm \sqrt{f^2_Q + f^2_{\rho g H} + f^2_C + f^2_n}$$

$$f_\eta = \pm 2,16 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta\eta = \pm 0,2\%$$

5.0 - ENSAIOS REALIZADOS

5.1 Ensaio de Rendimento / Eficiência (com os resultados obtidos)

O rendimento médio ponderado do modelo encontrado, sob o sigma de instalação, no ensaio testemunhado foi de 91,68%, valor que atende integralmente a garantia contratual de 91,40%. Entretanto foram constatadas melhorias nos valores isolados da eficiência em baixa carga que integram o cálculo do rendimento médio ponderado.

A seguir são mostradas as curvas da Eficiência X Potência e Eficiência X Vazão respectivamente.

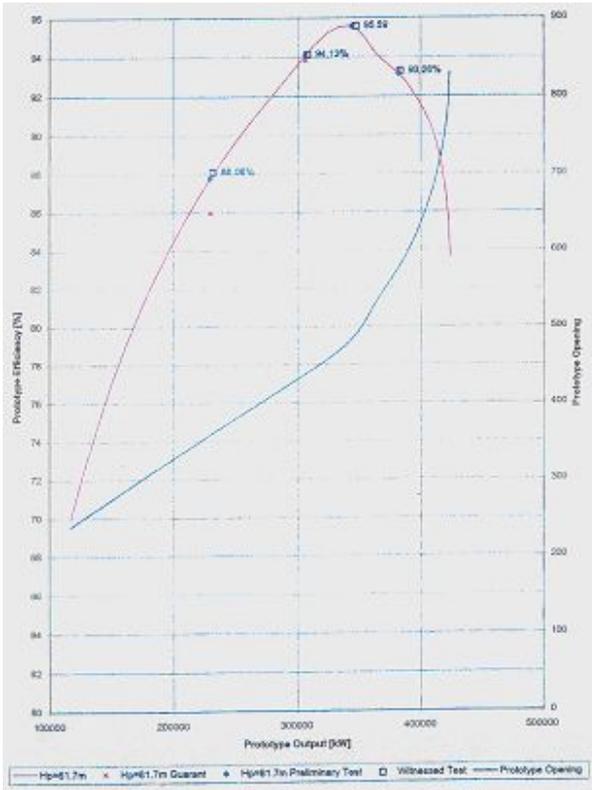


FIGURA 1- (a) Gráfico Eficiência X Potência

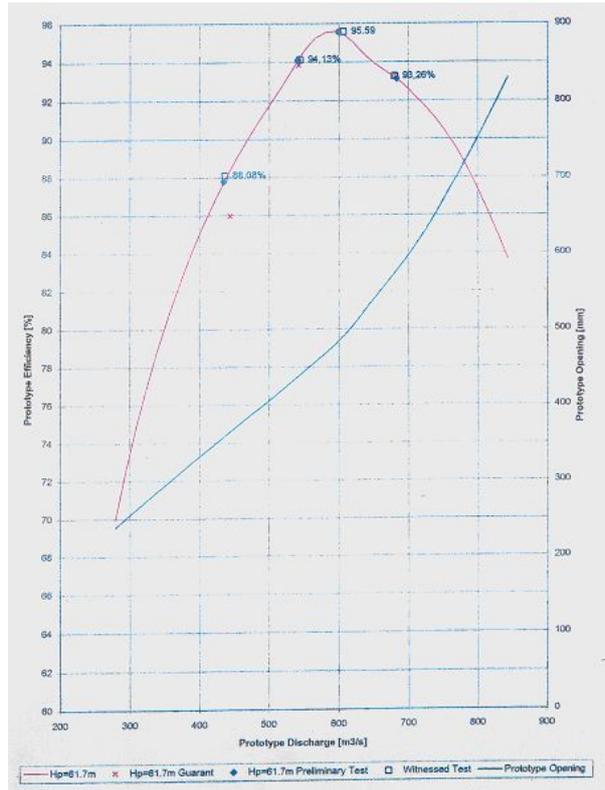


FIGURA 1- (b) Gráfico Eficiência X Vazão

5.2 Rendimento Médio Ponderado

O rendimento médio ponderando (RMP) é calculado de acordo com a equação abaixo, para as potências indicadas na tabela e seus devidos fatores de ponderação.

$$\text{RMP} = A / B \text{ [%]}$$

Onde: $A = \sum [(KVA) (P) (\eta)]$ $B = \sum [(KVA) (P)]$ η = rendimento em cada "step" de potência.

Os resultados obtidos para o rendimento médio ponderado estão mostrados na Tabela 3 abaixo.

TABELA 3- Características garantidas da turbina – Quedas Ponderadas.

QUEDA LÍQUIDA [mca]	POTÊNCIA [%]	POTÊNCIA [KW]	VAZÃO [m³/s]	REND. PROTÓTIPO [%]	FATOR DE PONDERAÇÃO W
65,8	100	396.000	655,44	94,3	1
65,8	90	356.400	583,69	95,3	9
65,8	80	316.800	534,27	92,55	8
65,8	60	237.600	435,64	85,13	2
61,7	100	382.000	682	93,23	24
61,7	90	343.800	598,74	95,58	20
61,7	80	305.600	541,98	93,86	20
61,7	60	229.200	443,66	85,99	5
51,3	100	295.000	627,66	94,09	2
51,3	90	265.500	562,77	94,45	4
51,3	80	236.000	514,74	91,79	4
51,3	60	177.000	415,23	85,34	1

$$\text{Rendimento médio ponderado garantido do modelo} = \frac{\sum P_{11} m \cdot \eta_m \cdot W}{\sum P_m \cdot W} = 91,40 \%$$

$$\text{Rendimento médio ponderado garantido do protótipo} = \frac{\sum P_{11} p \cdot \eta_p \cdot W}{\sum P_p \cdot W} = 93,60 \%$$

Vale ressaltar que este rendimento é garantido, sob condições nominais de tensão, velocidade de rotação, frequência e fator de potência (0,96), que o rendimento da unidade calculado conforme descrito anteriormente não será menor que 98,547%.

5.3 Ensaio de Cavitação

Os experimentos de cavitação no modelo são desenvolvidos utilizando a similaridade de THOMA, considerando a parte inferior das pás.

5.4 Ensaio de Estabilidade (Flutuações de Pressão e Torque com Curvas)

Foram feitas três séries de medições e os seguintes comentários podem ser realizados:

- O máximo nível de flutuação foi atingido em carga parcial, com a abertura do distribuidor do modelo de 13,1 mm (abertura angular de 18,8°), sob a queda máxima de 65,8 m, com a frequência em torno de ¼ da velocidade síncrona do rotor, com nível RMS de 3,9 %. Neste ponto, a flutuação de torque é menor que 0,1%. Estas flutuações são principalmente localizadas no cone do tubo de sucção, especialmente na parte interior do cotovelo. Não há nada a mencionar sobre a caixa espiral;
- Com relação à influência do fator de cavitação no ponto de operação onde se constatou a maior flutuação de pressão, pode-se concluir, que para cada garantia, a máxima flutuação foi obtida próxima ao fator de cavitação de instalação (sigma plant);
- A influência da admissão de ar, no ponto onde a maior flutuação foi medida, é nitidamente notada com a redução expressiva das flutuações, sob uma vazão de ar de 0,15% da vazão turbinada. Essa influência foi igualmente constatada no protótipo.

5.5 Controle Dimensional

O controle dimensional deve ser realizado para garantir a similaridade entre o modelo reduzido e o protótipo. Entre outras, pode-se citar que as seguintes partes foram verificadas:

- As principais dimensões da caixa espiral, do pré-distribuidor, do tubo de sucção e do intervalo entre distribuidor e rotor (entreferro);
- As principais dimensões do rotor, incluindo os diâmetros de entrada e saída, a altura de entrada, a cinta e cubo. A forma dos canais do rotor assim como a forma das palhetas diretrizes e das palhetas fixas do pré-distribuidor;
- Os labirintos e suas respectivas folgas.

O controle dimensional demonstrou que as dimensões do modelo estavam dentro das tolerâncias estabelecidas pelo IEC e, portanto garantem a similaridade entre modelo e protótipo.

6.0 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM OS VALORES GARANTIDOS

- A eficiência e os resultados de saída conferem com as exigências contratuais. Os principais resultados são: eficiência média ponderada do modelo reduzido = 91,68% (valor garantido = 91,40%) e eficiência média ponderada do protótipo reduzido = 93,90%;
- De acordo com o teste de cavitação, um comportamento satisfatório de cavitação do protótipo pode ser esperado dentro da escala de operação do projeto Tucuruí II como fornecido pela documentação contratual. Os ajustes das unidades são satisfatórios e a erosão do protótipo espera-se estar dentro dos limites do contrato. A margem de segurança na cavitação cumpriu os valores garantidos;
- A velocidade de disparo máxima estabilizada confere com as exigências contratuais;
- O nível das flutuações de pressão cumpriu os valores garantidos para toda a área de operação de Tucuruí II. Para alguns pontos, a admissão natural do ar, será necessária para manter valores garantidos;
- Os valores de torque nas palhetas diretrizes obtidos no relatório de teste modelo preliminar estão de acordo com as garantias contratuais. Os valores de torque nas palhetas diretrizes são valores cumpridos.
- A pressão diferencial nos dois jogos de duas tomadas de pressões situadas caixa espiral foi medida e os resultados são apresentados na forma:

$$Q = k \times \Delta H^{0,5}$$

- Concordou-se entre as duas partes que o projeto do modelo teórico escalado ao protótipo pode ser usado para a fabricação do mesmo.

7.0 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO TRANSPOSTO PARA O PROTÓTIPO COM OS RESULTADOS DE CAMPO

Atualmente, a usina conta com cinco unidades montadas, sendo uma em comissionamento e quatro unidades já em operação comercial.

A primeira das onze unidades já operou por mais de 10 mil horas, apresentando resultados de funcionamento dentro do esperado. Sendo que as faixas de potência estão dentro das garantidas e apresentam funcionamento sem vibrações excessivas, ou seja, para a operação da usina, estas novas unidades representam um sucesso em aplicação de máquinas deste porte.

É esperada a realização em breve de um ensaio de "index test", que conforme contrato, somente será realizado em uma única unidade. Os dados deste teste irão confirmar o comportamento do protótipo. Entretanto, o sistema de monitoramento em tempo real, instalado nestas unidades, mostra que todas características esperadas para protótipo, durante a realização do ensaio de modelo, foram atendidas na íntegra.

8.0 - CONCLUSÕES

O teste de aceitação do modelo realizado no laboratório da fornecedora, de acordo com o programa de teste modelo, mostrou que todas as medidas e os testes requeridos pelo cliente foram concluídos com êxito total pelo laboratório.

Ficou concordado que o fornecedor estava liberado a prosseguir com o projeto dos protótipos das turbinas, baseado no projeto teórico do modelo, falando para o cliente as provisões de contrato e as tolerâncias geométricas especificadas no IEC código 60193.

Todas as características requeridas pela contratante para a unidade foram atendidas, de forma que esta máquina representa o estado da arte, para as turbinas deste porte.

Os dados de monitoramento e do acompanhamento da operação da unidade mostram que o protótipo atende ao esperado no ensaio, confirmando e validando a realização deste tipo de teste para unidades deste porte.

A realização do ensaio de modelo possibilitou a fabricação de uma turbina que atende as necessidades da usina, bem como garantiu a confiabilidade do investimento. Este tipo de ensaio ainda é a melhor forma de se avaliar a performance de uma turbina deste porte, antes de sua fabricação.

O ensaio possibilitou as ações imediatas de projeto, para que os rendimentos fossem os melhores possíveis, otimizando o projeto e permitindo a aplicação de uma turbina que gere mais energia, com menos engolimento de água.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Siervo, F.; Leva, F. Modern Trends in Selecting and Designing Francis Turbines, Water Power & Dam Construction, 1976.
- (2) Lugaresi, A.; Massa, A. Trends in the Last Decade, Water Power & Dam Construction, 1987.
- (3) Walker, J.H. Project Data for Hydroelectric Generators Water Power & Dam Construction, Part one and Part two - 1966.
- (4) ELETRONORTE - ENGEVIX - THEMAG - UHE TUCURUÍ - Relatórios Técnicos.
- (5) Bureau of Reclamation - Selecting Hydraulic Reaction Turbines - Engineering Monograph N° 20 - 1976.
- (6) VIVIER, L., " Turbines Hydrauliques et Leur Regulation - Paris-1966.
- (7) KOVALEV N.N., "Hydroturbines Design and Construction" - Jerusalem 1965.
- (8) METCALF, E.T., Principles of the design and operation of three - Phase Synchronuos machines Rio de Janeiro Promon.
- (9) NEYRPIC, Rapport des Essais Contractuels Sur Modele Reduit, Effectues du 25 Setembre au 2 Octobre 1978.
- (10) Turbine Model Test, Final Model Test Report Tucuruí II, ALSTOM, 2001.