SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GGH - 01
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

ESTUDOS PARA AUMENTAR A FAIXA PERMITIDA DE TRABALHO DAS UNIDADES GERADORAS DA UHE SOBRADINHO

Eduardo Manuel da Mota Silveira * **Carlos Juarez de Britto Leite** **Alexander Malyshev** **Victor Arm**

CHESF **CHESF** **LMZ** **LMZ**

RESUMO
O reservatório da UHE Sobradinho tem a função de regularizar o trecho do rio São Francisco que fica à jusante. A baixa hidraulicidade no período, o aumento da demanda, a falta de investimentos em novas obras de geração, motivada pela política governamental de então, deterioram essa função, com indicação da possibilidade de atingir em 1999 um nível abaixo do mínimo normal. A Chesf decidiu tomar medidas preventivas para enfrentar o cenário. Formulou um programa de trabalho, incluindo estudos visando a determinar um novo nível mínimo para o reservatório. Nesse Informe Técnico é relatado o conteúdo dos estudos e das ações conduzidas.

PALAVRAS-CHAVE

Nível, queda, vorticidade, came.

1.0 - INTRODUÇÃO

A Chesf, com uma potência instalada de cerca de 10.600 MW, tem 93,9% do seu parque de geração instalado no rio São Francisco que, banhando 05 estados da federação, é conhecido como o rio da integração nacional. A bacia do rio está representada na figura 1 ao lado.

Das oito usinas da Chesf instaladas no São Francisco, a Usina Hidrelétrica de Sobradinho, mesmo não sendo a mais moderna, nem a de maior potência instalada, guarda uma peculiaridade que a faz sobressair-se das demais. Seu reservatório, com uma capacidade total de acumulação de 34,1 bilhões de metros cúbicos, é o responsável pela regularização plurinanual dos trechos submédio e baixo do rio e, por conseqüência, da operação das outras sete usinas situadas à jusante.

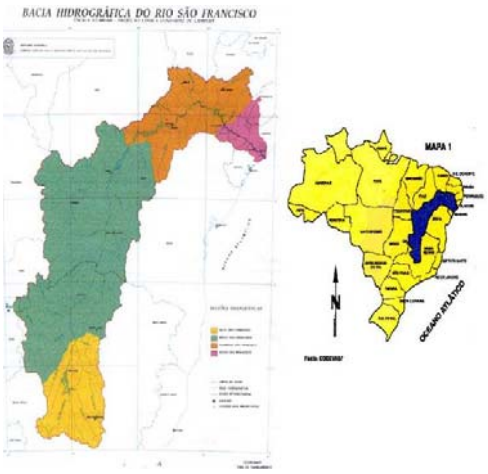

FIGURA 1

*Rua Delmiro Gouveia, 333 – Sala C 235 - CEP 50761-901 - Recife - PE - BRASIL.
Tel: (081) 3229-3018 - Fax: (081) 3229-2629 - e-mail: eduardo@chesf.gov.br

Portanto, a UHE Sobradinho situa-se como a primeira usina da Chesf na cascata, e apresenta um volume de acumulação que responde por 60% do volume útil total do Sistema Equivalente do rio São Francisco como um todo, incluindo o reservatório da usina Três Marias, pertencente à CEMIG. Visto no universo do sistema Chesf, o reservatório assume uma importância ainda maior, com uma capacidade de 76%, e cria a condição diferenciada para a usina, com um papel de crucial importância para o sistema de geração da Chesf.

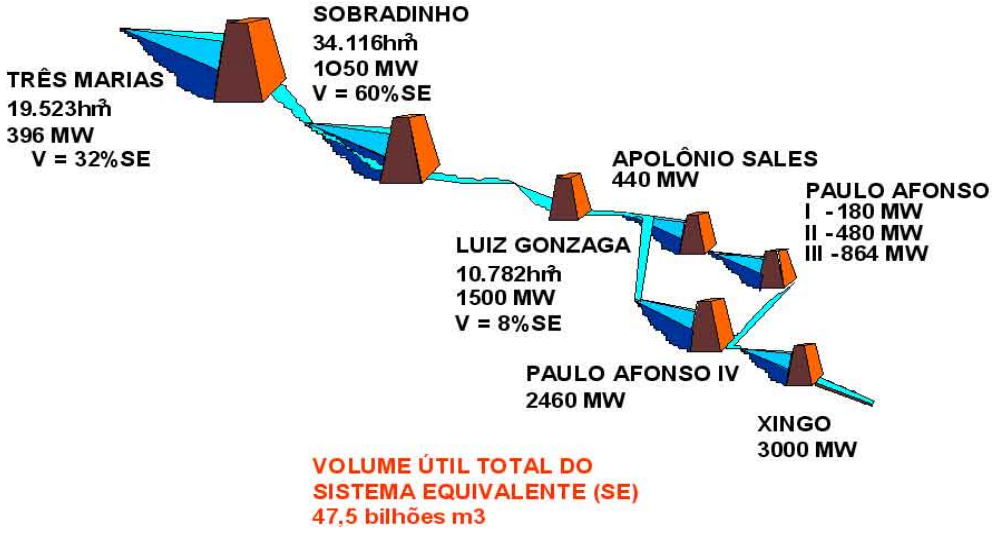

FIGURA 2

A UHE Sobradinho entrou em operação em 1979, equipada com seis turbinas Kaplan de 175 MW, de rotor de 9,5 metros de diâmetro. As máquinas foram adquiridas de fabricantes russos. As turbinas, da Leningradsky Metallichesky Zavod - LMZ, e os geradores, da Electrosila, sob intermediação da Energomachexport, hoje Power Machines. Com base nos dados hidrológicos, foram projetadas para operar sob queda líquida nominal de 27,2 metros, com variações admitidas na faixa delimitada por 18 e 31,8 metros. Em razão da inexpressiva flutuação do nível de jusante, os limites são preponderantemente definidos pelo nível de montante do reservatório, que oscila entre as elevações 392,50 m e 380,50 m, faixa que caracteriza o volume útil do reservatório igual a 28,6 bilhões de metros cúbicos, energia armazenada para utilização nas usinas que ficam à jusante e que compõem, grosso modo, 90% da potência total da cascata do São Francisco que é explorada pela Chesf. Assim, a queda mínima de 18 metros está associada ao nível mínimo operativo de montante igual a 380,5 metros. O desafio existente era determinar se seria possível operar as unidades com o nível de montante abaixo dessa cota, lançando mão de uma fração dos 5,5 bilhões de metros cúbicos do volume morto do reservatório. O plano de trabalho então instituído abordava a questão de forma estruturada em cinco etapas a seguir discriminadas:

- Levantamento do histórico operacional das unidades e determinação da vida útil remanescente;
- Estudos teóricos e analíticos das turbinas;
- Análise de transientes;
- Testes em modelo reduzido;
- Realização de testes e medições de campo.

Concluídas essas etapas, e definida a possibilidade de funcionamento com um novo nível mínimo, seria iniciada a fase de instalação em campo das modificações determinadas pelo fabricante das turbinas.

2.0 - LEVANTAMENTO DO HISTÓRICO OPERACIONAL DAS UNIDADES E DETERMINAÇÃO DA VIDA ÚTIL REMANESCENTE

Foram computadas as horas de operação das seis máquinas - que até 1999 apresentavam um perfil variando entre 129.000 e 149.000 horas de funcionamento -, suas produções e calculada, em seguida, a carga média a que cada máquina foi submetida no período estudado.

A partir de formulação própria, utilizando quando possível dado específico de Sobradinho, e, quando não, adotando parâmetros similares obtidos em outras instalações, foi verificado que os fatores indutores de fadiga estavam dentro das faixas admitidas. A investigação cobriu o bielismo, pás do rotor Kaplan, palhetas diretrizes, e pré-distribuidor. Os cálculos, levando em conta as informações disponíveis, comprovaram, como era de se esperar, que os esforços hidráulicos, inclusive para quedas de até 15 metros, provocavam tensões de trabalho

nas palhetas diretrizes dentro do permissível, e que as pressões de operação do sistema oleodinâmico eram suficientes para garantir a movimentação das pás do rotor Kaplan e das palhetas diretrizes.

3.0 - ESTUDOS TEÓRICOS E ANALÍTICOS DAS TURBINAS

Nessa fase dos trabalhos, foram desenvolvidos os desenhos de todos os elementos do caminho hidráulico das turbinas. É importante ressaltar que em função da similitude existente entre as usinas de Jerdap, localizada no rio Danúbio, separando a Romênia da Sérvia, e a de Sobradinho, a Chesf tomou como válidos para Sobradinho os resultados dos ensaios em modelo das turbinas de Jerdap, quando assinou seu contrato de fornecimento. Desse modo não haviam sido, até os trabalhos aqui descritos, realizados os ensaios em modelo reduzido das turbinas de Sobradinho. Por essa razão, aproveitando a necessidade, foi fabricado o modelo reduzido destas turbinas.
O modelo reduzido foi construído com um rotor Kaplan de diâmetro igual a 0,46 metros, do que, em face do diâmetro do protótipo, resulta uma relação de transposição de 1:20,65. Foi elaborado o projeto e emitidos os desenhos da caixa espiral, pré-distribuidor, palhetas diretrizes e tubo de sucção. Na seqüência foram calculados esforços solicitantes das pás do rotor Kaplan e das palhetas diretrizes, para quedas entre 15 e 31,8 metros.
Foi desenvolvida a modelagem matemática das pás do rotor Kaplan e das demais partes que compõem o caminho hidráulico. Em seguida iniciou-se o processamento da modelagem tridimensional do fluxo, cobrindo quedas entre 15 e 31,8 metros. Os resultados indicaram que com quedas decrescendo até 15 metros não ocorrem:

- queda brusca de potência por causa de cavitação;
- aumento de erosão por “pitting” nas pás do rotor Kaplan devido a cavitação, exceto na aresta de entrada onde o efeito de cavitação é mais intenso;
- separação da coluna líquida e formação de fluxo reverso à jusante do rotor e na entrada do tubo de sucção que pudessem levar ao aumento das cargas dinâmicas atuantes sobre a estrutura da turbina.

4.0 - ANÁLISE DE TRANSIENTES

Foi desenvolvida análise por modelagem matemática para avaliar as conseqüências para as turbinas de uma rejeição de carga na hipótese de as unidades estarem operando sob quedas inferiores a 18 metros. Foram considerados como parâmetros limitantes a sobrevelocidade de 42% para a rotação nominal de 75 rpm, e sobrepressão de 5 metros, ambos os valores definidos no projeto original das máquinas. Os resultados indicaram um acréscimo de pressão de apenas 1,6 metro, enquanto a sobrevelocidade máxima atingiu 25,6%, ambos abaixo dos limites. Ressalta-se, ainda, que o empuxo axial ascendente em decorrência de uma situação transiente alcançaria 600 toneladas, valor bem menor do que o peso das partes rotativas. Portanto, um transiente hidráulico para a queda de 15 metros não representa problema para o equipamento.

5.0 - TESTES EM MODELO REDUZIDO

Os ensaios em modelo reduzido foram realizados em fevereiro de 2001, de acordo com as prescrições da norma IEC 193 e sua Alteração 01 de 1977. Basicamente buscou-se determinar o comportamento da turbina operando sob quedas abaixo de 18 metros. Foram impostas ao modelo reduzido condições de funcionamento que representavam quedas de 17,56 metros, 14,06 metros, 11,51 metros e 9,6 metros. Os resultados das duas últimas quedas foram desprezados por se constatar que para o nível de jusante de 361,1 metros, que permanece praticamente constante, resultariam níveis de montante abaixo da cota 373,5 metros, correspondente à tomada d’água dos filtros do sistema de resfriamento da Usina, limite impossível de ser infringido. Por outro lado verificou-se que para quedas abaixo de 14 metros o fluxo tornava-se irregular e perturbado, contra-indicando a operação da turbina nessa zona de trabalho. A rotação de disparo medida apresentou-se decrescente com a redução da queda. Foi observada a formação de vórtices na tomada dágua, através de uma janela para tal fim prevista no modelo, para as quedas mais baixas. Por último foi medida amplitude de pico-a-pico da flutuação de pressão, com os transdutores localizados na entrada da caixa espiral e no cone do tubo de sucção, abaixo do rotor Kaplan. Foi verificado que os níveis de flutuação de pressão crescem muito para as quedas abaixo de 14 metros, chegando a flutuação de pico-a-pico a atingir magnitudes de 10 a 14% das respectivas quedas, desaconselhando a operação em tais faixas. A imprecisão total das medições efetuadas, calculada como recomenda a International Electrotechnical Commission - IEC 193, foi de 0,243%.

6.0 - REALIZAÇÃO DE TESTES E MEDIÇÕES DE CAMPO

Dando seqüência ao plano de trabalho, foram iniciados os serviços de campo, assim constituídos:

6.1 – Testes não-destrutivos das pás Kaplan e inspeção visual das palhetas fixas do pré-distribuidor

Foi inspecionada por ultra-som e líquido penetrante uma faixa de 200 mm ao longo da aresta das pás, tanto no lado de pressão quanto no lado de sucção, na região delimitada pela confluência da pá com a aba situada na sua periferia. Todos os defeitos revelados no exame com líquido penetrante foram enquadrados como irrelevantes.
Identicamente, todos os defeitos encontrados pelo ensaio de ultra-som foram tidos, confrontados com os critérios, como aceitáveis.

6.2 – Medição da freqüência natural das palhetas diretrizes

As palhetas foram excitadas por um martelo e a vibração decorrente, livre no ar, foi captada por um conjunto de nove acelerômetros aplicados no seu terço central e, a partir disso, determinadas suas freqüências naturais. Os resultados encontrados foram congruentes com aqueles calculados, com uma imprecisão inferior a 2,5%. Inferiu-se a partir desse resultado que as vibrações naturais das palhetas estavam suficientemente afastadas daquelas induzidas pelos vórtices de von Karman para a faixa de quedas entre 18 e 15 metros, não havendo perigo de ocorrência de ressonância nessas estruturas.

6.3 – Medição da conjugação entre a abertura do distribuidor e a posição das pás Kaplan

Os testes foram realizados na unidade 5, sob uma queda bruta de 23,14 metros, para as condições de conjugação – "on-cam", e desconjugação, "off-cam", das pás Kaplan com as palhetas do distribuidor. Na condição off-cam as grandezas foram medidas para aberturas das pás do rotor Kaplan fixadas nos ângulos de giro -10º, -5º, 0º, +5º, +10º e +12,5º, com a turbina em controle manual, sendo a abertura do distribuidor alterada e comandada pelo limitador de abertura, montado no cubículo do atuador. Foram medidos e registrados o curso do servomotor do distribuidor – S_0, em milímetros, os níveis de montante e de jusante, em metros, a potência nos terminais do gerador em MW, por um wattímetro eletrônico, classe de precisão 0,2. Com base nessas medições foi calculada a potência da turbina, observando a seguinte relação:

$$P_t = \frac{P_g}{\eta_g}$$

onde:

P_t =Potência da turbina, em MW

P_g =Potência do gerador, em MW

η_g = rendimento do gerador

Para o cálculo da potência da turbina foram adotados os rendimentos do gerador definidos no contrato.

Também foi medida a pressão diferencial entre pontos situados em determinada secção transversal da caixa espiral, para calcular a vazão da turbina pelo consagrado método Winter-Kennedy. Com base nas informações obtidas pela série de ações descritas, foi possível determinar o rendimento da turbina, como abaixo indicado:

$$\eta_{tur} = \frac{P_t \times k \times 100}{H_b \times \sqrt[2]{\Delta h}}$$

onde:

η_{tur} = rendimento da turbina, em %

P_t = Potência da turbina

k = coeficiente de conversão, calculado para a condição de rendimento máximo no protótipo e no modelo

H_b = Queda bruta, em metros

Δh = pressão diferencial medida na seção transversal da caixa espiral, em mm

Considerando as definições acima, os testes foram efetuados. Os resultados estão plotados no gráfico da figura 3, na qual se pode observar, para cada ângulo ensaido das pás do rotor Kaplan, a abertura do distribuidor a que corresponde o melhor rendimento da turbina na queda ensaiada. Esses pontos são determinados por meio da movimentação das palhetas diretrizes e medindo a potência de saída do gerador., Assim procedendo determinou-se uma série de seis pontos, que interligados estabeleceram o perfil da envoltória do campo de atuação otimizado para aquela máquina.

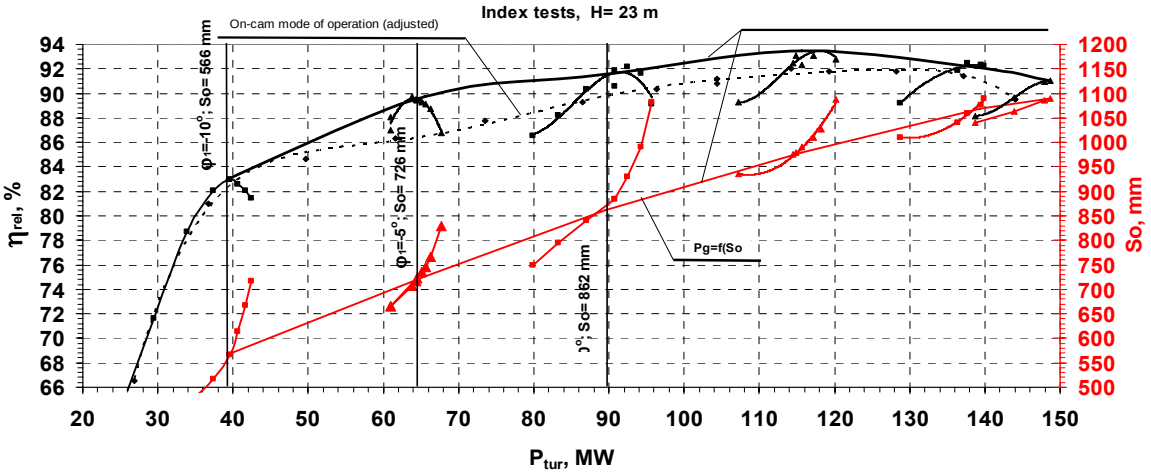

FIGURA 3

Examinando a figura 3, no que concerne ao comportamento do rendimento, curvas com tinta preta, verifica-se a existência de duas curvas representando comportamentos distintos da máquina. A inferior, com trajetória identificada por uma linha preta tracejada, corresponde à condição na qual a máquina foi encontrada. Acima desta está plotada a envoltória dos pontos de rendimento ótimo para cada ângulo ensaiado das pás. Percebe-se com facilidade a existência, na faixa entre 60 e 80 MW, de uma defasagem de cerca de 3% entre os rendimentos obtidos nas duas diferentes condições.

Constatada a diferença, foram efetuados ajustes na cadeia cinemática responsável pelo correlacionamento entre as pás Kaplan e as palhetas diretrizes para corrigir a defasagem encontrada. Na figura 4 estão identificados os dois estágios de ajustes dessa correlação. A linha tracejada unindo os pontos identificados por triângulos corresponde à situação encontrada. A linha contínua conectando os pontos identificados por círculos corresponde ao perfil perseguido, derivado dos resultados encontrados nos ensaios realizados no modelo reduzido da turbina. A linha contínua que interliga os pontos identificados por pequenos quadrados representa o ajuste final deixado no equipamento. Pode-se concluir que os testes de campo consolidaram a indicação apontada pelo ensaio em modelo reduzido, dada a perfeita coincidência entre a curva de relacionamento ótimo de abertura das pás Kaplan x abertura das palhetas diretrizes gerada pelo modelo reduzido e a mesma curva obtida pelas medições realizadas na Usina, na busca de se encontrarem os pontos de melhor rendimento.

Como decorrência natural dos resultados encontrados, surgiu a recomendação de processar ajuste idêntico em todas as demais unidades geradoras.

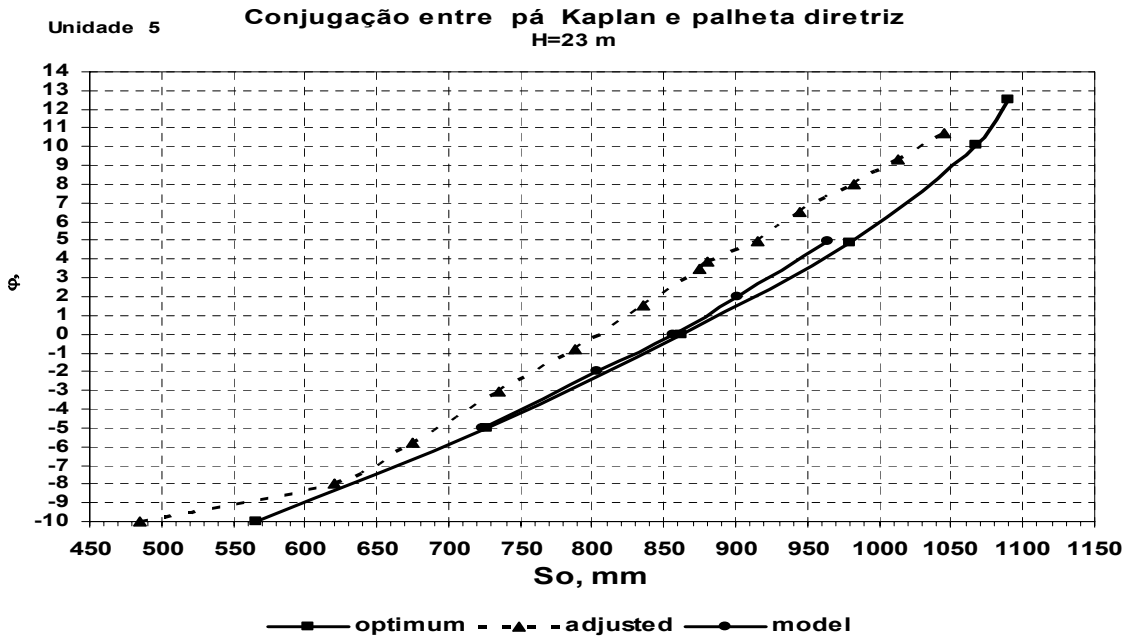

FIGURA 4

6.4 – Medição de flutuação de pressão no caminho hidráulico
A medição da flutuação de pressão foi realizada com a unidade operando com a conjugação otimizada. O ponto de tomada da pressão foi instalado nas proximidades da porta de acesso ao tubo de sucção. O nível de flutuação de pressão configurou uma faixa de operação segura para o equipamento.

6.5 – Vibração no mancal e na tampa da turbina
Foram medidas as vibrações radiais na caixa do mancal guia da turbina e as vibrações verticais na tampa da turbina, com resultados satisfatórios nos dois casos.

6.6 – Avaliação dos esforços atuantes no distribuidor a nas pás Kaplan
Foram medidas as pressões atuantes nos servomotores de acionamento das palhetas diretrizes e das pás Kaplan. Em ambos os casos confirmou-se a existência de considerável margem de segurança para a pressão diferencial, além de os resultados de campo terem indicado coerência entre os valores medidos e os calculados na etapa anterior do trabalho.

De uma maneira geral os testes de campo ratificaram os resultados calculados e os obtidos nos ensaios em modelo reduzido, o que reforçou as conclusões anteriores no sentido de liberar a operação da unidade sob quedas abaixo de 18 metros. Ficou evidenciada, ainda, a necessidade de reajustar a conjugação de todas as demais unidades.

Concluída essa etapa, e com base nas investigações realizadas, diagnosticou-se que tomando por base o estado dos principais componentes da máquina, a sobrevelocidade controlada e ao aumento de pressão na caixa espiral em caso de rejeição de carga indicavam que é possível a operação normal e segura da unidade com o nível de montante até a elevação 377,50 metros, em vez da elevação 380,50 metros, parâmetro definido no estágio anterior do projeto das unidades.

Os cames existentes, componentes responsáveis pela conjugação da posição relativa entre as pás Kaplan e o distribuidor foram construídos levando em conta a faixa de quedas original, de 18 a 31,8 metros. Por isso foi necessária a substituição por novas peças, adequadas para garantir o sincronismo de posicionamento dos elementos da turbina, entre as quedas de 31,8 até 15 metros.

7.0 - SUBMERGÊNCIA MÍNIMA NA TOMADA D'ÁGUA

Além das conclusões do fabricante das turbinas, a Chesf debruçou-se sobre a faixa mínima de submergência a ser observada na determinação do novo nível mínimo de montante, de modo que a formação de vorticidade na tomada d'água não viesse a pôr em risco a integridade do equipamento. Para tanto conheceu e fez uso de metodologia expedita usada pela Eletronorte ao se defrontar com situação semelhante na Usina de Balbina, anteriormente publicada na referência bibliográfica 2. Por esse procedimento, o nível de montante é dado pela seguinte expressão:

$NM = CTA + Afog = CTA + (0,4 * K * V * H^{0,5}) = CTA + (0,4 * K * Q/AC * H^{0,5})$, onde:

CTA = cota do topo da tomada d'água
Afog = afogamento mínimo
K = coeficiente de segurança
Q = vazão turbinada para manter o nível de jusante mínimo
AC = área da comporta
V = velocidade da água = Q/AC
H = altura da comporta

Substituindo os valores, encontra-se NM = 369,242 + K *2,81. O nível mínimo operacional de montante, em condições normais, é comumente calculado usando-se K = 3 como coeficiente de segurança contra a formação de vórtices na tomada d'água. Aplicando-se esse critério, obtém-se $NM_{min\ normal}$ igual a 377,67 m. O nível assim determinado muito pouco difere, praticamente converge, do que foi determinado pelo fabricante do equipamento.

Outra forma de comprovar a existência de margem de segurança contra a formação de vórtices, operando com o nível de montante na elevação 377,50 m, foi obtida plotando no gráfico do artigo acima citado as condições particulares de Sobradinho, identificado neste Informe como figura 5. Observa-se que na região inferior, abaixo da faixa hachurada, estão assinalados pequenos quadrados correspondentes a tomadas d'água onde houve registro de formação de vorticidade. A faixa hachurada representa a fronteira, considerada como submergência mínima.

Na parte superior estão assinalados pequenos círculos correspondentes a instalações livres da formação de vórtice. Para os dados de velocidade da água na tomada d'água, altura da comporta e da submergência do topo da tomada, determina-se a posição indicada na figura, ficando assim comprovada a existência de margem de segurança em Sobradinho, com o nível de montante na elevação 377,50 m.

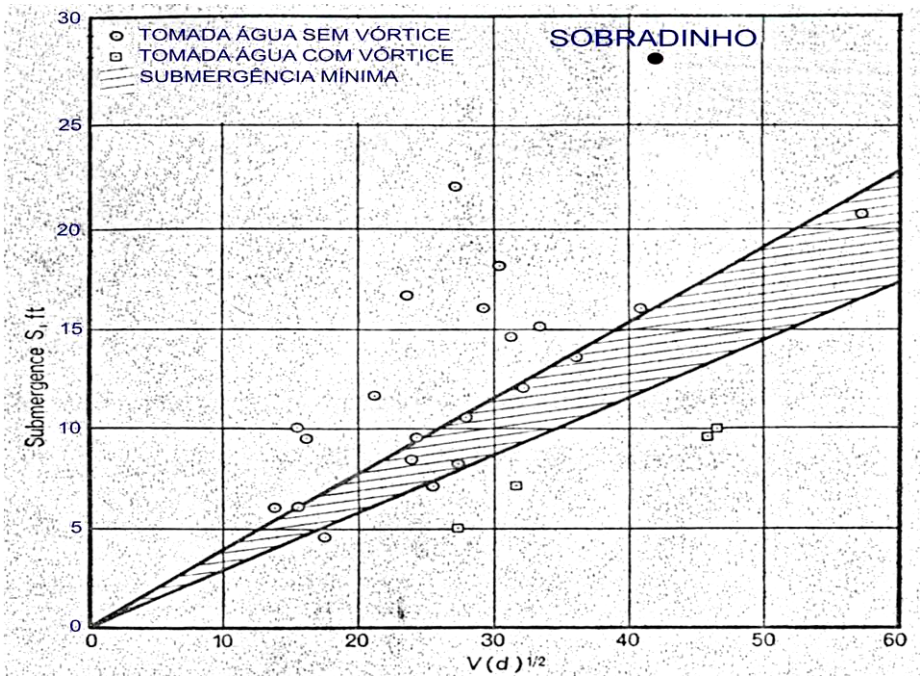

FIGURA 5

8.0 - TROCA DOS CAMES

Para assegurar a aplicação de recursos de maneira eficiente, a Chesf decidiu efetuar inicialmente a troca do came em apenas uma turbina, ficando a repetição do serviço nas demais condicionada aos resultados obtidos. Com o resultado assegurando a evolução positiva, decidiu-se implantar em todas as unidades, com o resultado abaixo

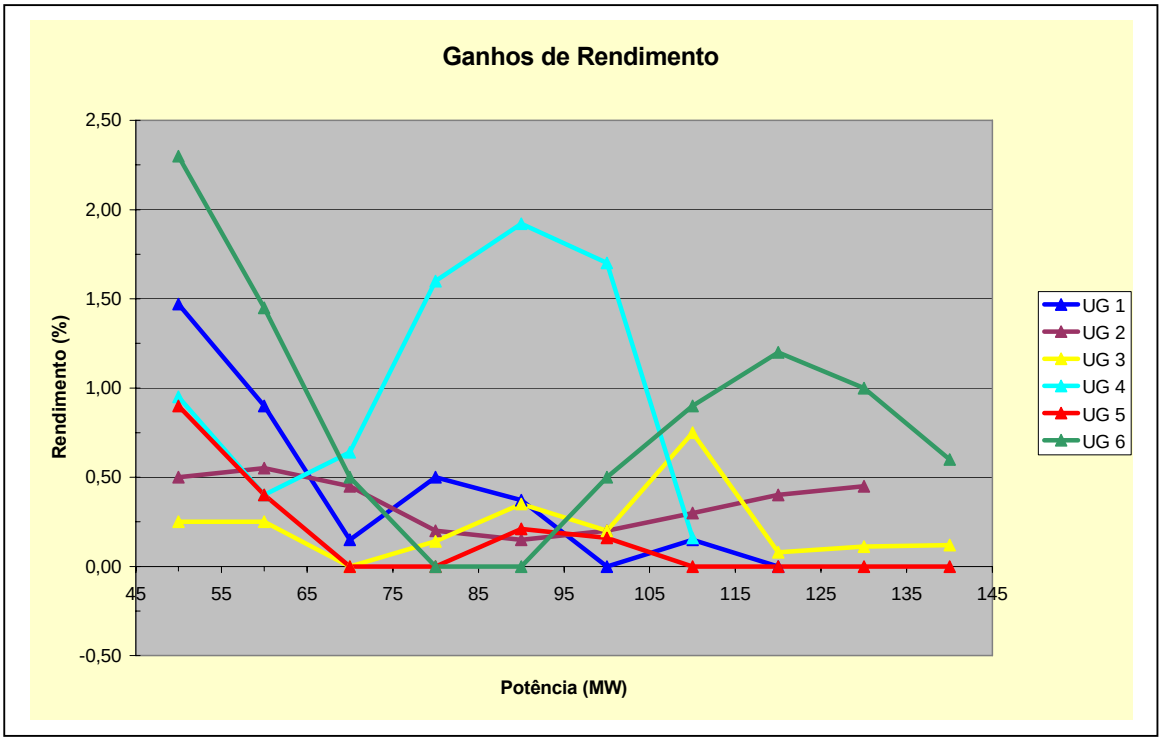

FIGURA 6

A diferença primordial entre a peça antiga e o novo came reside no fato de que, para o mesmo comprimento da superfície de revolução, o perfil foi modificado de sorte a comandar a conjugação de movimentos para toda a faixa de quedas. Sua nova definição geométrica originou-se nos resultados obtidos nos ensaios em modelo reduzido e nos dados obtidos nos ensaios de campo anteriormente referidos. Efetivada a troca e processados os ajustes no mecanismo da cadeia cinemática, componentes situados no cubículo do atuador, verificaram-se os ganhos de eficiência apresentados na figura 6.

9.0 - GANHO POTENCIAL

9.1 Volume equivalente

O reservatório da UHE Sobradinho tem um volume útil de cerca de 28,6 bilhões de metros cúbicos. A liberação para sua operação até a elevação 377,50 m, três metros abaixo do nível mínimo 380,50 m originalmente estabelecido, equivale a um acréscimo de 2,7 bilhões de metros cúbicos, ou, em outras palavras, um incremento de 9,6% no volume útil do reservatório.

10.0 - CONCLUSÂO

10.1 A implementação do processo exposto neste Informe determinou ganhos significativos em termos de aumento da faixa operativa delimitada para o equipamento, ao liberar para operação quedas de até 15 metros, quando originalmente as quedas estavam limitadas, no seu valor mínimo, a 18 metros.

10.2 No processo de troca e ajustes do mecanismo de conjugação das palhetas diretrizes do distribuidor com as pás do rotor Kaplan, foram obtidos ganhos de rendimento variáveis de máquina para máquina. Na faixa de quedas ensaiada o melhor resultado coube à unidade 4, com um incremento médio de 1,05 ponto percentual nas potências testadas, o que leva a supor que essa unidade estava com o pior grau de conjugação. O resultado menos expressivo foi observado na unidade 5, atingindo, ainda assim, um ganho médio de 0,17%. Os ganhos oscilaram desde valores nulos até ganhos de 1,92%, caso particular da unidade 4 para a queda ensaiada de 20,4 metros e potência de 90 MW.

10.3 A despeito dos resultados, a Chesf não alterou a forma de operação do reservatório para não violar compromissos assumidos na fase de projeto, o que traria reflexos negativos para a comunidade que circunda o reservatório, dificultaria, e até impediria, a operação de captação de água para projetos de irrigação e a operação de embarcações na eclusa que faz parte do projeto. A operação do reservatório em cotas abaixo da elevação 380,50 m, em princípio, só seria praticada em situação extremamente crítica de hidraulicidade, e depois de tomadas as devidas providências para contornar as dificuldades e honrar os compromissos mencionados. Nesse quadro, ao invés de verter água pelos descarregadores de fundo para assegurar vazões defluentes que alimentariam os cerca de 9.000 MW instalados nas outras usinas da cascata, a água seria turbinada, até o novo limite inferior da elevação 377,50 metros.

10.4 É possível que se obtenham ganhos idênticos de rendimento em outras unidades geradoras do tipo Kaplan do parque de geração nacional, caso elas também não estejam com os seus mecanismos de conjugação devidamente ajustados.

11.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Final Technical Report – Leningradsky Metallichesky Zavod – LMZ – São Petersburgo - 2001

(2) GORDON, J. L. Vortices at Intakes, Water Power, April 1970

(3) Technical Report 1494 Field tests on the Unit No. 4 after replacement of the old cam by a new one – LMZ – São Petersburgo – 2002

(4) Relatório Técnico Troca dos cames antigos nas cinco máquinas com execução de ensaios índex – LMZ – Sobradinho - 2003