

# **CONTRIBUIÇÕES METODOLÓGICAS VISANDO A OUTORGA DO USO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA**

\*Leopoldo Uberto Ribeiro Junior  
\*Afonso Henriques Moreira Santos  
\*Edson da Costa Bortoni  
\*Marco Aurélio Raphul Azevedo Garcia

\*Pesquisador do Pesquisador do CERNE - Centro de Estudos em Recursos Naturais e Energia da Universidade Federal de Itajubá; Doutorando pela Universidade Estadual de Campinas- UNICAMP; e-mail: leopoldo@unifei.edu.br;

\*Professor titular da Universidade Federal de Itajubá, e-mail: afonso@iee.efei.br

\*Professor adjunto da Universidade Federal de Itajubá, e-mail: bortoni@iee.efei.br

\*Pesquisador do CERNE - Centro de Estudos em Recursos Naturais e Energia da Universidade Federal de Itajubá, marco.rag@iee.efei.br

## **RESUMO**

Este trabalho visa dar continuidade nos estudos desenvolvidos por SANTOS (2003), com propósito de minimizar os impactos sócio-econômico sofridos pelas populações lindeira, decorrente do rebaixamento prolongado do nível d'água do reservatório. O maior exemplo, nesse cenário, é o lago de Furnas com seus 3500 km de perímetro.

Em busca de uma mitigação desses impactos, este artigo vem mostrar que é possível a adoção de um modelo de operação que pondere os interesses das populações de jusante (interessada na regularização de vazões) e de montante (interessada em um deplecionamento menos intenso de menor duração e menos freqüente).

## **ABSTRACT**

This item, has a propose of continue the studies developed buy SANTOS (2003), with a purpose of minimize the social-economic impact, endured for the people that leave near the reservoir, as a resulting of the long period of reduction of the level of water. A good example for these, is the Furnas Lake with 3500 Km of perimeter.

Looking for a solution to mitigate the impact, these article show that it is possible to adopt a model to operate that are going to decrease the level reduction, not only for the intensity, for the duration and frequency , without a penalization for the people that leave downstream the embankment.

## **JUSTIFICATIVA**

Em seu texto, SANTOS (2003), afirma que os modelos empregados pelo setor elétrico estão sujeitos a uma série de incertezas, que os torna pouco robustos e, obviamente, de difícil compreensão por parte da sociedade.

Destacam-se, nesta série, parâmetros econômicos, tais como a taxa de desconto, os custos de geração térmica e o custo do déficit, sendo que os dois primeiros estão submetidos a grande influência externa e o segundo é, ainda pouco definido tecnicamente, funcionando mais como um parâmetro regulador.

Ainda falando de incertezas, os modelos projetam demandas e expansão do parque gerador, que quase nunca se materializam, notadamente a ampliação da geração. Observa-se, da crise recente do setor, que era prevista uma expansão, fortemente baseada em termelétricidade, que não ocorre e nem vai ocorrer como prevista. Além do mais o setor elétrico busca um ótimo global, ouvindo-se das necessidades locais, ou, quando muito, incorporando alguma restrição ambiental, como vazão mínima defluente.

Quando se fala das necessidades locais, pode ser citado, o caso das comunidades, que desenvolvem suas atividades econômicas no lago dos reservatórios e que têm sofrido enormemente, com os sensíveis deplecionamentos, não apenas pelas intensidades, mas, sobretudo, pelas suas durações.

Dentre vários eventos, podem ser citados a impossibilidade recente de navegação em Itaipu, o impacto ao turismo e piscicultura nos reservatórios de Caconde e Furnas, o prejuízo a culturas permanentes irrigadas no Vale do São Francisco e os danos ocorridos em Três Marias decorrentes das variações de vazões ocasionando grande influência na navegação, assoreamento, meio ambiente e outros usos da água.

Em busca de uma atenuação desses impactos, este trabalho vem mostrar que é possível a adoção de um modelo de operação que pondere os usos múltiplos da água, conforme preconiza a lei 9.433/97, atendendo os interesses das populações de jusante (interessada na regularização de vazões) e de montante (interessada em um deplecionamento menos intenso, menos freqüente e de menor duração), contrapondo o protótipo atual, que tem como foco principal a geração de energia.

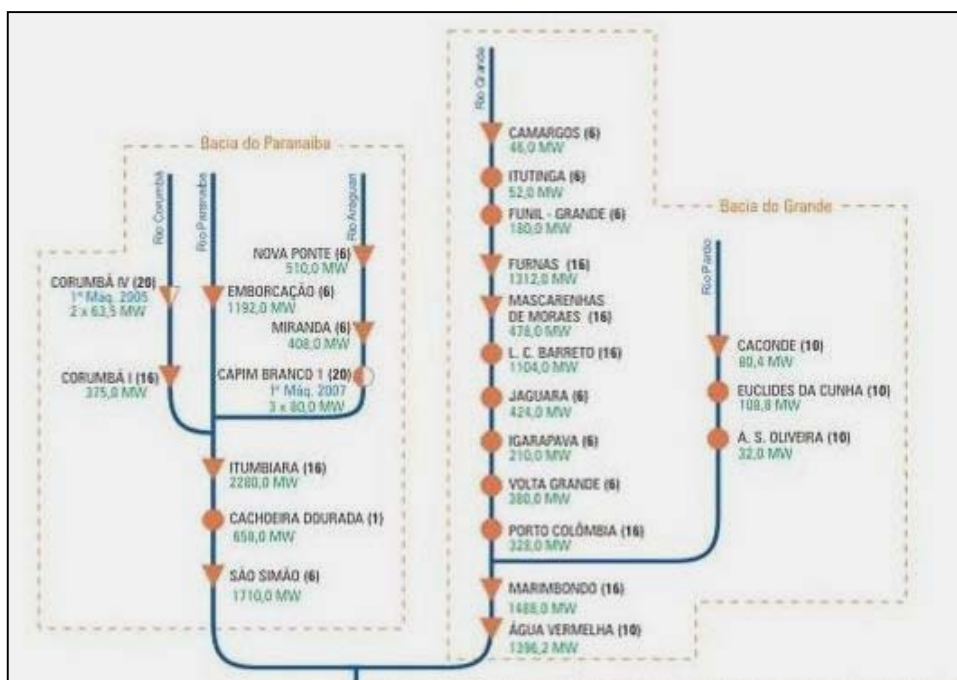
A metodologia desenvolvida neste capítulo e que será aplicada a UHE de Furnas, visa fazer uma reflexão sobre atual o modelo de operação do sistema elétrico brasileiro. Presentemente, o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, concentra sua atuação sobre o Sistema Interligado Nacional -SIN, sendo a maior parte da capacidade instalada composta por usinas hidroelétricas, que se distribuem em 12 diferentes bacias hidrográficas em diversas regiões.

Como as usinas hidrelétricas são construídas onde melhor se pode aproveitar as afluições e os desníveis dos rios, comumente em locais distantes dos centros consumidores, foi necessário desenvolver no país um extenso sistema de transmissão, formando caminhos alternativos, permitindo transportar a energia produzida até os centros de consumo. Mais ainda, as grandes interligações possibilitam a troca de energia entre regiões, permitindo obter benefícios a partir da diversidade de comportamento das vazões entre rios de diferentes bacias hidrográficas.

Desde meados da década de 70, o sistema eletroenergético brasileiro é operado de forma coordenada, visando obter ganhos sinérgicos a partir da interação entre os agentes. A operação coordenada visa minimizar os custos globais de produção de energia elétrica, contemplando restrições intra e extra-setoriais e aumentando a confiabilidade do atendimento. Conceitualmente, a operação centralizada do Sistema Interligado Nacional está embasada na interdependência operativa entre as usinas, na interconexão dos sistemas

elétricos e na integração dos recursos de geração e transmissão no atendimento ao mercado.

A interdependência operativa é causada pelo aproveitamento conjunto dos recursos hidrelétricos, através da construção e da operação de usinas e reservatórios localizados em seqüência em várias bacias hidrográficas. Desta forma, a operação de uma determinada usina depende das vazões liberadas a montante por outras usinas que podem ser de outras empresas, ao mesmo tempo em que sua operação afeta as usinas a jusante, de forma análoga, figura 1.



**Figura 1- Diagrama Esquemático do Sistema Interligado Nacional**

Nos casos de períodos de condições hidrológicas desfavoráveis, as usinas térmicas podem contribuir para o atendimento ao mercado como um todo, e não apenas aos consumidores de sua empresa proprietária, e já chegou a alcançar 9,02% do total da produção de energia gerada. Nesta situação, deveria se exigir do ONS uma gestão cuidadosa dos reservatórios das usinas hidrelétricas, compatibilizando o uso múltiplo da água na produção de energia, navegação, abastecimento e questões ambientais, o que demandaria grande interação com a ANEEL, ANA, organismos federais e estaduais, CBH's e agentes associados. No entanto, a transferência de energia entre regiões, intensamente utilizada para a otimização sistêmica, privilegiando o ganho de energia, da maneira como é realizado nos dias atuais, beneficia toda a população brasileira, expondo os usuários do entorno dos reservatórios, a um grande risco econômico de suas atividades econômicas, sejam elas de pesca, navegação, turismo dentre outras, por estarem expostos a sazonalidade de níveis de água dos reservatórios, (ONS, 2004).

Neste estudo será mostrado que é possível, operar o sistema elétrico brasileiro, conforme já estabelecia, o Código de Águas (Decreto nº 24.643 de 1934), que em seu Artigo 143, instituiu que todos os aproveitamentos de energia hidráulica deverão satisfazer as exigências acauteladoras dos interesses gerais como: Alimentação e necessidades das populações ribeirinhas, salubridade pública, irrigação, proteção contra as inundações, conservação e livre circulação do peixe, o escoamento e rejeição das águas. Devendo ainda atender a outros aspectos, como beleza cênica e paisagística do rio beneficiando tanto a

população do entorno, como os usuários que se localizam adiante da casa de máquinas, com vazões regularizadas, assim como garantir que não haverá perda de energia ao sistema.

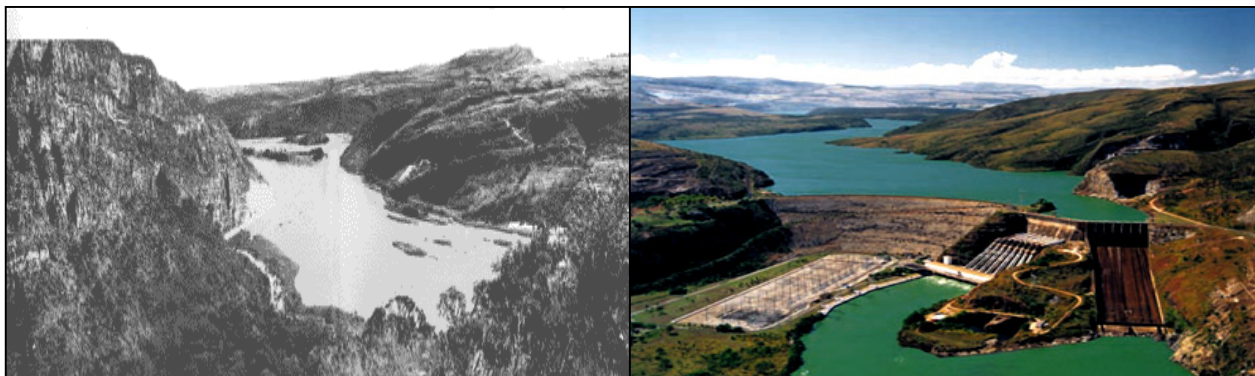
## **UHE DE FURNAS**

A Central Elétrica de Furnas foi criada em 28 de fevereiro de 1957, através do decreto federal número 41.066, com o desafio de sanar a grave crise energética que ameaçava os três principais centros socioeconômicos do país: São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte. Hoje, a Empresa conta com dez usinas hidrelétricas e duas termelétricas. São 42 subestações e 18.000 km de linhas de transmissão, (FURNAS, 2004).

A Usina Hidrelétrica de Furnas, figura 2, nosso estudo de caso, foi a primeira usina construída pela Empresa, da qual herdou o nome. A barragem está localizada no curso médio do rio Grande, no trecho denominado "Corredeiras das Furnas", entre os municípios de São João da Barra e São João Batista do Glória, em Minas Gerais. É administrada indiretamente pelo Governo Federal, vinculada ao Ministério de Minas e Energia e controlada pela ELETROBRÁS.

Sua construção começou em julho de 1958, tendo, a primeira unidade, entrado em operação em setembro de 1963 e a sexta, última prevista em projeto, em julho de 1965. No início da década de 70, foi iniciada sua ampliação para a instalação das sétima e oitava unidades, totalizando 1.216 MW, o que colocou a obra entre uma das maiores da América Latina.

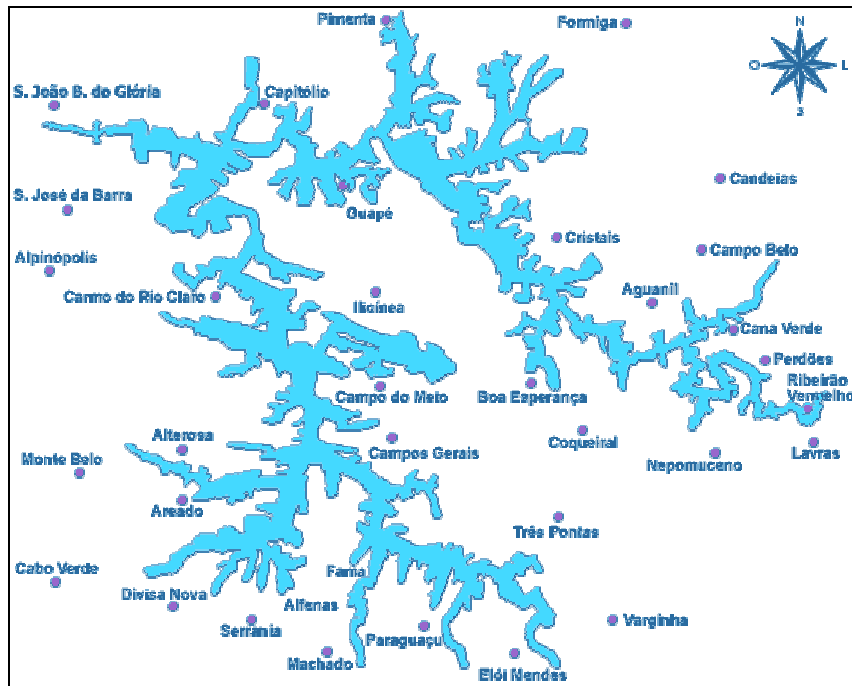
A potência prevista no início de sua construção correspondia a 1/3 do total instalado no Brasil. A Usina de Furnas, além de se constituir um marco de instalação de grandes hidrelétricas no Brasil, possibilitou a regularização do rio Grande e a construção de mais oito usinas, aproveitando, integralmente, um potencial de mais de 6.000 MW instalados.



**Figura 2 – Represa de Furnas antes e depois de sua implantação**

**Fonte: Furnas (2004)**

O Reservatório de Furnas tem cerca de 1440 Km<sup>2</sup> de área inundada e perímetro de 3500 Km, banha 34 municípios, figura 3, com população de aproximadamente 800.000 habitantes. O enchimento do reservatório de 22,95 bilhões de m<sup>3</sup> e volume útil de 17,21 bilhões de m<sup>3</sup> ocorreu em 1963 a geração média de energia, foi de 700MW. O projeto de aproveitamento prevê uma variação de cota entre 768 e 750m (nível máximo e mínimo de operação).



**Figura 3 - Municípios do Entorno de Furnas**

Fonte: Praias de Minas

Segundo ENGEL (2000), o rebaixamento prolongado do nível das águas do reservatório de Furnas, figura 4, resultante de condições hidrológicas desfavoráveis e de redução nos investimentos do setor elétrico brasileiro, somado aos percalços na programação de entrada em operação de novas usinas e de linhas de transmissão, resultou em perdas significativas para os usuários das águas do Lago de Furnas. Estes passaram a pleitear uma cota mínima de operação do lago (762 m), que será utilizada como referencial para os estudos, além de recursos para tratamento dos esgotos urbanos. Dados da Associação dos Usuários do Lago de Furnas -ASUL mostram que os principais impactos do deplecionamento foram:

- Redução no movimento de turistas em 70%;
- Diminuição de 40 % na produção agrícola;
- Transtorno nas propriedades lindeiras para a dessedentação animal;
- Redução na qualidade e quantidade de peixes;



**Figura 4 – Estância Turística Escarpas do Lago na cidade de Formiga em dois momentos deplecionamento em 1998 e o reservatório cheio em 2003**

Além disso, SANTOS (2002), afirma que todo o esgoto proveniente das áreas urbanas, que antes era lançado diretamente no lago, embora sem qualquer tratamento conta de imediato com uma enorme capacidade de diluição, reduzindo sobremaneira seu impacto direto no ambiente. Com o rebaixamento do reservatório, o efluente passa a percorrer grandes distâncias a céu aberto, onde o processo de decomposição da matéria orgânica já se estabelece, provocando o aparecimento de odores e colocando em risco a saúde das pessoas e dos animais que possam com ele ter contato.

Igualmente aos problemas causados a diluição, o esvaziamento do reservatório até níveis extremos, por um longo período de tempo, tem permitido o aparecimento de grande quantidade de vegetação, principalmente nas áreas de várzea antes alagadas. Quando do retorno das águas aos níveis históricos de operação, a vegetação entrará em decomposição, com reflexos imediatos na piora da qualidade da água, notadamente junto às margens, onde se desenvolve a maioria das atividades turísticas, entre outras a pesca esportiva.

Adicionalmente, o autor, afirma que a exposição de extensas áreas de margens, especialmente as de topografia mais acidentada, acelera o processo de assoreamento, em virtude do carreamento do solo, que sem a proteção da vegetação é levado pelas águas de chuva, reduzindo o volume do reservatório, dificultando a utilização das águas próximas às margens, onde ocorre grande parte da atividade turística, e contribuindo com a degradação da qualidade da água.

O gráfico 1, mostra o comportamento do reservatório no período de 1998 a 2000, época de maior crise. Neste período, pode ser observado que em apenas 30% do tempo a usina operou em uma condição que não viesse a causar grandes danos para as populações que residem no entorno do lago, tomando por base a altura  $H_{req}$  solicitada pela população da ASUL (acima de 762 m).



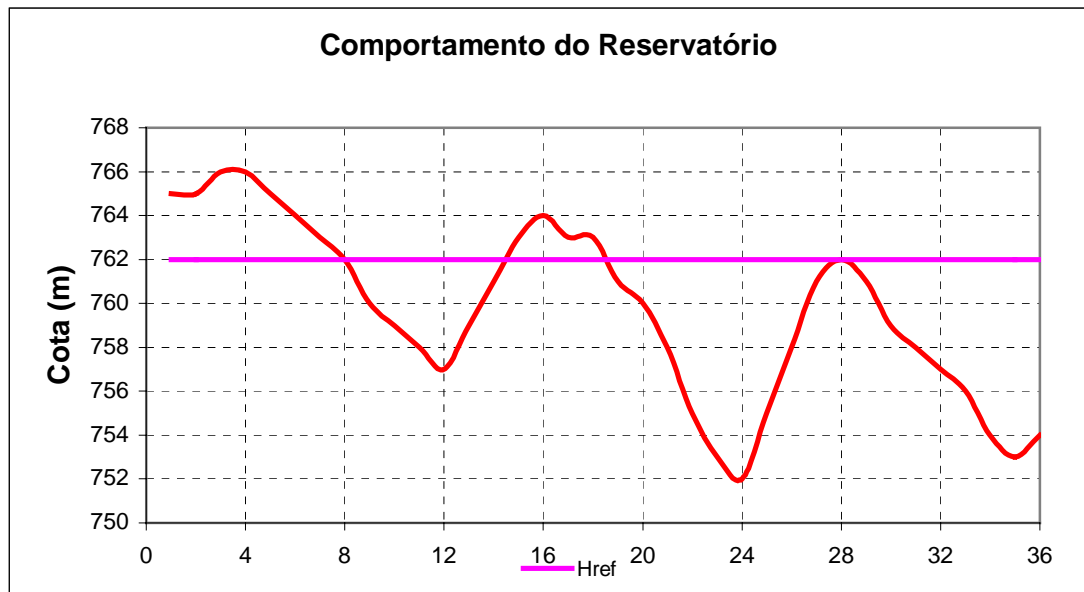


Gráfico 1 - Conduta do lago entre 1998 e 2000

## O MODELO

Conforme mencionado no início desse capítulo, às incertezas de operação do modelo, acarretam conflitos entre os interesses dos usuários que residem à jusante de um reservatório e a que vive no seu entorno.

Assim, a proposta dessa parte do trabalho, é minimizar os efeitos das operações, que levam os reservatórios a trabalhar em extremos, justificadas em sua grande parte por problemas macroeconômicos. Isto seria possível, caso as Usinas Hidrelétricas fossem outorgadas, pela duração e freqüência do nível de água a ser mantida nos lagos, trazendo por conseqüência uma maior segurança na permanência tanto de cotas como de vazões.

Desde modo, num primeiro passo, se buscou um critério neutro de operação, neste caso, o reservatório deveria perseguir, uma vazão defluente, que se aproxima –se ao máximo da vazão média de longo termo, definindo uma política de operação de minimização do desvio-médio quadrático, ao longo do tempo. Ou seja:

$$\min z = \sum_{i=1}^T (\bar{Q} - Q_{di})^2 \quad (1)$$

Sujeito a:

$$VA_t = VA_o + \sum_{i=1}^T (Q_{ai} - Q_{di}) \quad (2)$$

$$VA_{\min} \leq VA_t \leq VA_{\max}, \forall t \quad (3)$$

Onde:

$\bar{Q}$	Vazão média (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{di}$	Vazão defluente no instante i (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{ai}$	Vazão afluyente no instante i (m <sup>3</sup> /s)
$VA_t$	Volume regularizado (m <sup>3</sup> )
$VA_o$	Volume morto (m <sup>3</sup> )
$VA_{\min}$	Volume mínimo (m <sup>3</sup> )
$VA_{\max}$	Volume máximo (m <sup>3</sup> )

Essas equações revelam, na verdade, um antigo método gráfico, conhecido como “fio estendido” ou Conti-Varlet. Pode -se resolvê-lo por diferentes processos, mas a programação dinâmica tem –se mostrado mais eficiente segundo Santos (2001). As figuras 4 e 5 mostram, para o lago de Furnas, o efeito regularizador alcançado, utilizando–se somente este critério. As figuras 6 e 7 apresentam, respectivamente, as curvas de duração de vazões e de nível ao reservatório.

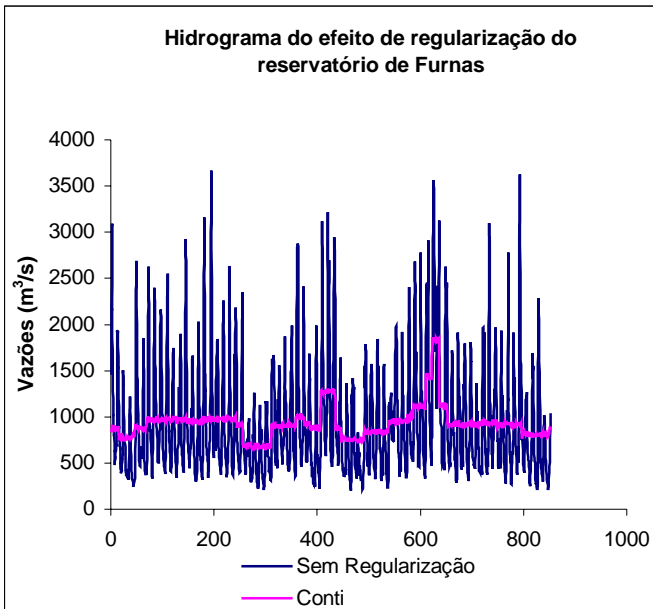


Figura 5 – Hidrograma de Furnas

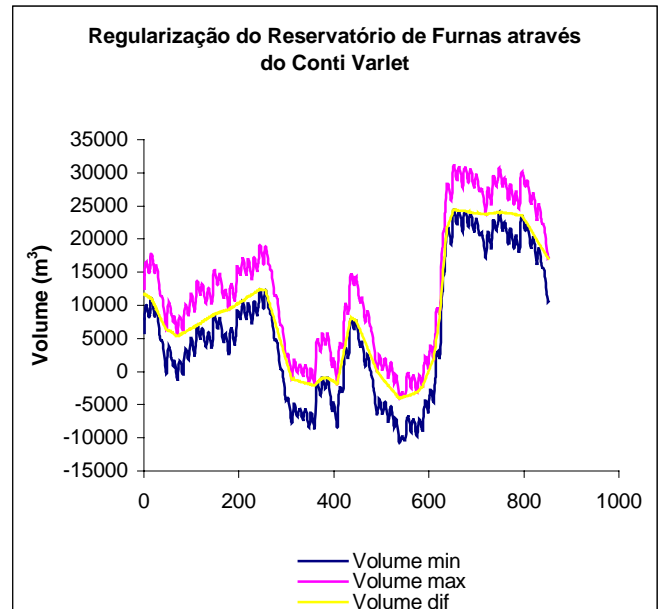


Figura 6 – Regularização do reservatório

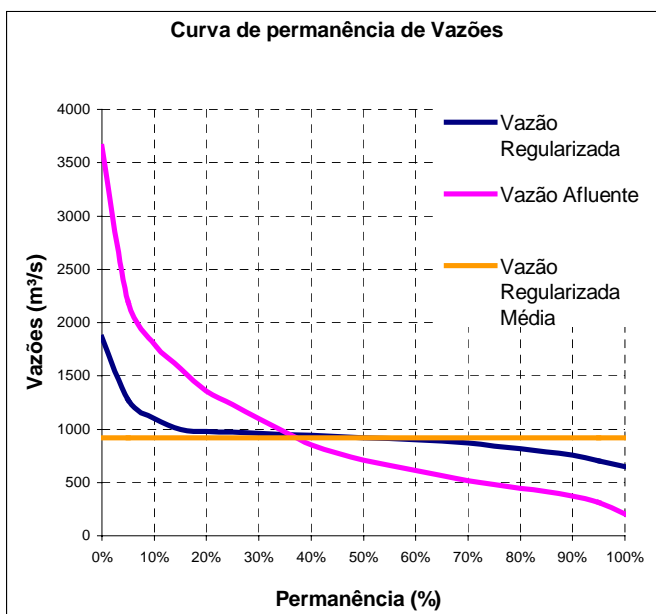


Figura 7 - Curvas de duração das vazões

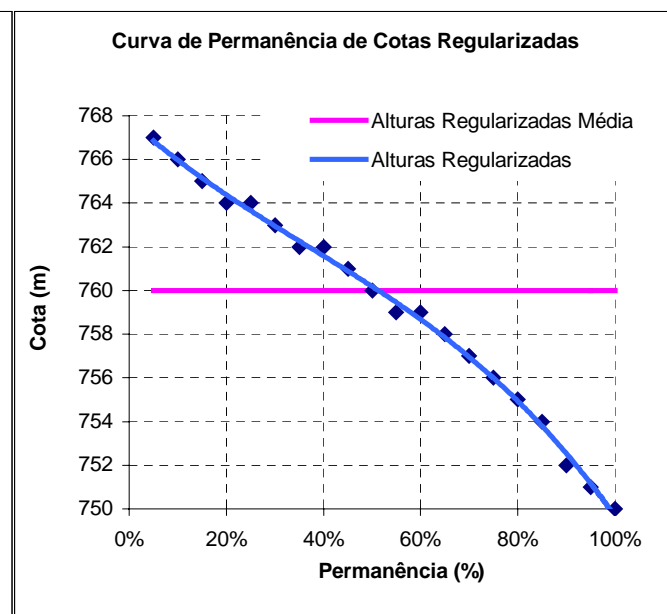
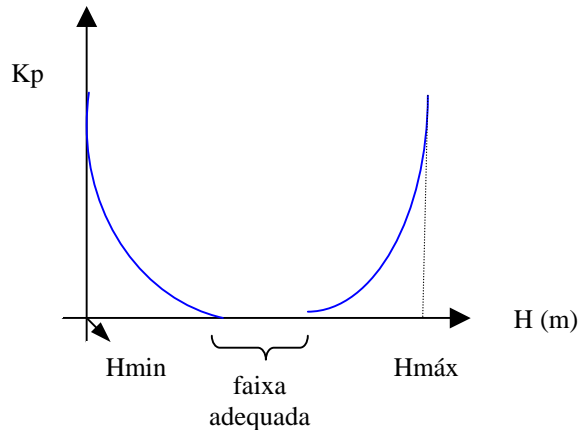


Figura 8 - Curva de duração de nível rio

A redução do volume útil seria uma demanda evidente da população local, e poderia ser atendida, em certa medida, sem maiores perdas. Lembre-se que a curva cota-volume tem forte concavidade, representando, em seu início menor inclinação, o que leva a significativos ganhos de cota para pequenas perdas de um volume útil. Neste caso, pode ser verificado, que o reservatório teve um



rebaixamento superior á 4 metros 75% do tempo, e com a redução de 66% do volume útil, passaria ter um deplecionamento de 25%. Mas, essa perda pode ser essencial para períodos longos de escassez hídrica. Preferível seria mudar o critério operativo, preservando a parte inferior do volume acumulado apenas para casos extremos. Propõe-se, então, uma evolução da função objetiva, dada em (1), incorporando aí, uma penalização para níveis indesejáveis do reservatório, que poderia ser crescente conforme se desviasse da faixa desejada. A figura 9 mostra essa curva de penalidade, ressaltando aí, que o fator de punição ( $k_p$ ) cresce tanto para níveis mais baixos, quanto para mais altos, em relação à faixa desejada.



**Figura 9- comportamento do fator de punição ( $K_p$ )**

Portanto, a função objetiva evoluiria para:

$$\min z = \sum_{i=1}^T (\bar{Q} - Q_{di})^2 + kp_i \quad (4)$$

Sujeito às mesmas restrições anteriores, e sabendo que:

$$kp_i = f(H_t) = f(g(VA_t))$$

Onde:  $H_t$  é a altura regularizada (5)

Para que se possa ponderar a adequada influência de cada parcela da função objetivo na operação do reservatório, utilizou-se dois fatores de penalização  $W_1$  e  $W_2$ , conforme a expressão 6. O uso de penalidades irá permitir que sejam realizadas simulações para diferentes combinações de pesos, objetivando a visualização do efeito na regularização do nível do reservatório.

$$\min z = W_1 \cdot \sum_{i=1}^T (\bar{Q} - Q_{di})^2 + W_2 \cdot kp_i \quad (6)$$

As figuras 10 e 11 apresentam as curvas de duração de vazões e cota, para uma simulação com diferentes combinações de penalidades  $W_1$  e  $W_2$ , com altura de referência na cota máxima. Observe que quanto menor as penalizações para  $W_1$ , a de regularização de vazões vai se perdendo.

Sujeito a:

$$W_1 + W_2 = 1 \quad (7)$$

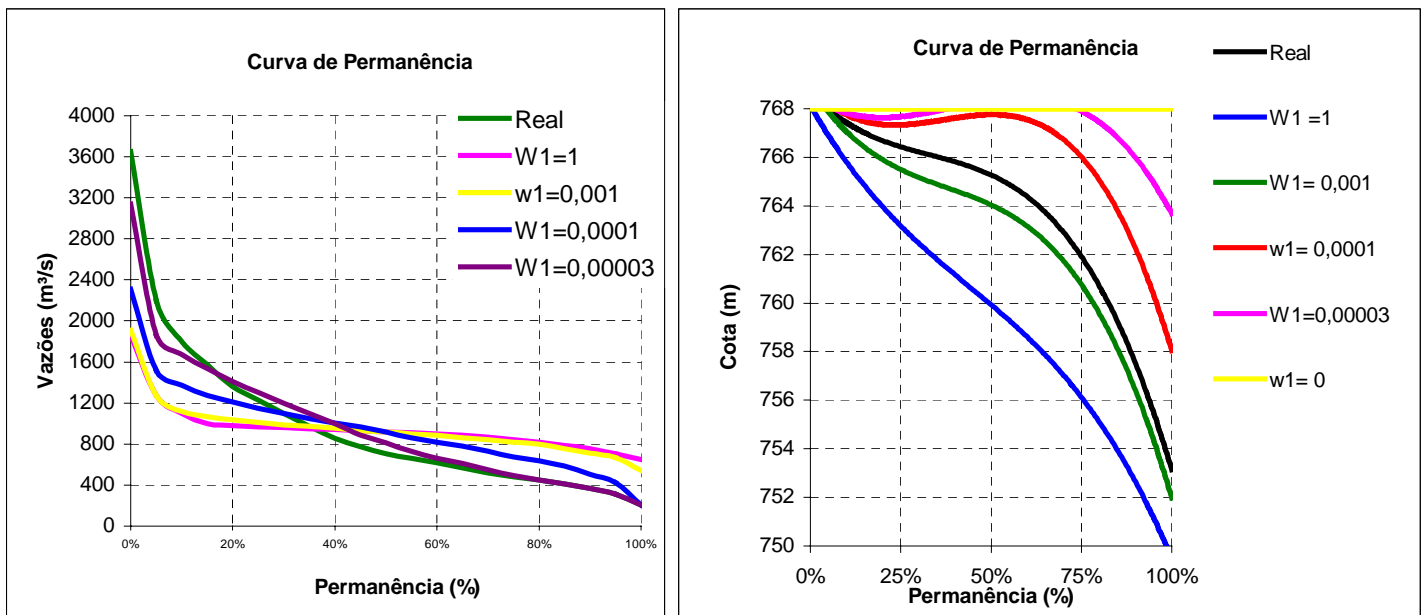


Figura 10 – Curva de duração de vazão

Figura 11 -Curva de duração de altura

Uma visão mais aprofundada, da realidade local, acusa que não só a intensidade do deplecionamento afeta os circunvizinhos do lago. O tempo em que o espelho d'água permanece baixo é, sem sombra de dúvidas, de enorme importância. O caso específico evidencia que a significativa duração de um deplecionamento intenso, chegando a atingir 22 meses consecutivos abaixo da cota 762, é que causou a falência generalizada das pousadas e outras estruturas de turismo. Portanto, a fictícia negociação entre as populações de montante e de jusante da barragem deverá ponderar a regularização para jusante com a intensidade e duração do deplecionamento.

A proposta deste artigo é no sentido de se estabelecer uma “janela móvel”, para se obter o nível ponderado nos últimos  $T_j$  meses.  $T_j$  pode ser, por exemplo, um semestre ou um ano. Então, tem-se em revisão na expressão (5), transformando-a em:

$$\min z = \sum_{i=1}^T (\bar{Q} - Q_{di})^2 + \sum_{j=i-T_j}^i kp_j \quad (7)$$

Mais uma vez será utilizado fatores de ponderação, de modo que a expressão (7) será contemplada com os ponderadores  $W_1$  e  $W_3$ . As simulações a seguir visam estabelecer uma análise da influência de cada fator na regularização.

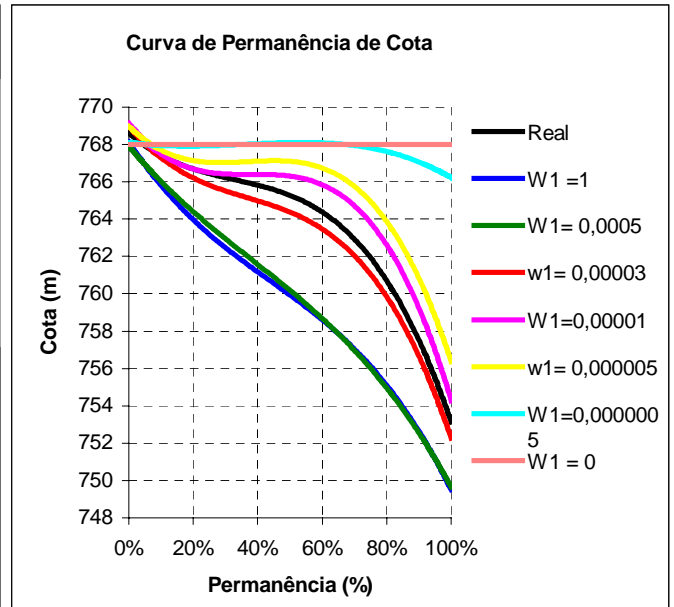
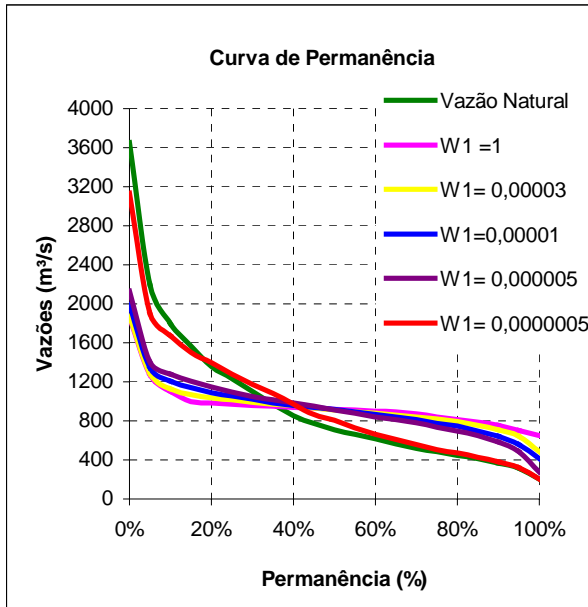
$$\min z = W_1 \cdot \sum_{i=1}^T (\bar{Q} - Q_{di})^2 + W_3 \cdot \sum_{j=i-T_j}^i kp_j \quad (8)$$

Sujeito a:

$$W_1 + W_3 = 1$$

As figuras 12 e 13 apresentam o efeito de diferentes penalidades na curvas de duração de vazões e de cota, considerando uma janela móvel semestral, respectivamente, onde se observa que o reservatório permanece com maior regularização de vazões quanto maior for o valor de  $W_1$ , assim, para  $W_1 = 0$  a vazão regularizada será a mesma da vazão natural, quando se analisa o

efeito sobre as cotas, ocorre justamente o oposto, para menores valores de W1, implicando maiores penalidades para W3, observa-se que o deplecionamento ocorre de maneira pouco intensa, tendendo a regularizar o nível dos reservatórios.



**Figura 12 – Curva de duração de vazões**      **Figura 13- Curva de duração de cotas**

De uma maneira elementar, desprezando o efeito sistêmico, poder-se-ia incluir nos debates sobre os diversos interesses a geração de energia elétrica. Simplificadamente, se o objetivo fosse apenas maximizar a geração no próprio aproveitamento, a estratégia operativa se aproximaria de manutenção do nível em seu valor máximo, obtendo-se máxima potência. Eventualmente, poderia se ter pequenos rebaixamentos para permitir futuras acumulações de água, que, caso, contrário, seria vertida, fure a limitação das turbinas. Nota-se assim, que a estratégia de maximização da geração local é muito próxima dos interesses da população vizinha ao lago, não sendo, em princípio, necessário incorporar tal interesse na função objetivo. Basta ponderá-lo junto com a aversão ao deplecionamento.

Como ilustração, os dados da tabela 1 apresentam a geração média anual, para cada caso aqui simulado. Deve ser ressaltado, que conforme citado anteriormente, não será foco desse trabalho, a questão energética, como também seu efeito sobre o SIN. No entanto, pode ser observado que em grande parte dos casos, houve um ganho considerável de energia.

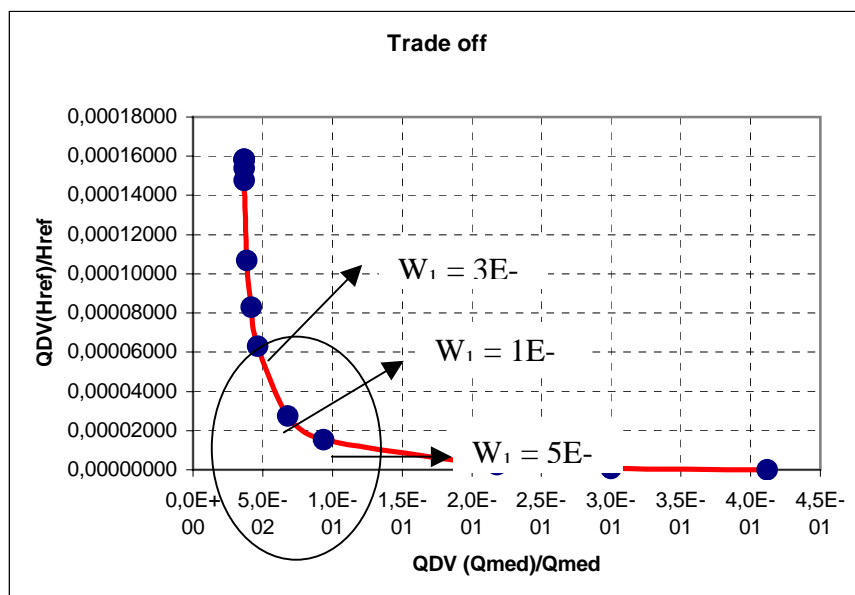
**Tabela 1– Geração média de energia elétrica para diferentes condições operativas**

PESOS		ENERGIA MÉDIA [MW]	PESOS		ENERGIA MÉDIA [MW]
W1	W3		W1	W3	
1	0	706.87	0.00001	0.99999	729.48
0.5	0.5	689.93	0.000005	0.999995	736.81
0.005	0.995	690.05	0.000001	0.999999	749.10
0.001	0.999	691,07	0.0000005	0.9999995	753.22
0.0005	0.9995	692.55	0.0000001	0.9999999	756.60

0.0001	0.9999	703.01	0.00000005	0.99999995	756.75
0.00005	0.99995	709.64	0	1	757,06
0.00003	0.99997	715.62			

Do ponto de vista sistêmico, há que se considerar que a geração elétrica extrapola os interesses locais. Historicamente, a geração hidrelétrica era responsável por quase a totalidade da produção elétrica, não havendo complementaridade térmica sensível por falta de capacidade instalada e pelos altos custos. Embora os programas de expansão da capacidade térmica, nos últimos anos, tenham sido um relativo fracasso, não se pode esquecer que hoje se tem uma significativa potência termelétrica. Nos sistemas onde a geração termelétrica é significativa, a hidrogeração funciona na base, não exigindo reservatórios de regularização para fins energéticos. Este parece ser o caminho para o nosso sistema. Dia a dia a relativa capacidade de regularização diminui, com a entrada de novas hidrelétricas associadas a pequenos reservatórios (tempos de estreitamentos relativamente pequenos). Logo, contar com a “automatização” dos reservatórios, para esse fim tem-se tornado de menor importância. Necessita-se, sim, de mudanças de critérios na operação eletroenergética, respeitando de forma mais objetiva, os interesses locais, que serão, certamente, impostos por CBHs bem organizados.

Ainda, explorando-se a disputa “Regularização de Vazões x Nível”, pode-se, para diferentes pesos para cada interesse, utilizar-se da técnica de “trade-off”, para decisão multi-objetivo. No eixo das abscissas se encontra o desvio padrão normalizado, que equivale a relação: “desvio médio quadrático para média”, relativa à vazão defluente. No de ordenadas, situam-se as relações “desvio médio quadrático ao nível de referência pelo nível de referência”, Obtém-se, assim, o gráfico da figura 15, onde cada ponto corresponde a uma certa ponderação para os distintos objetivos. Destaca-se, aí, a área “do joelho da curva”, onde supõe-se estar os pontos mais robustos.



**Figura 14 – Trade-off para decisão multi-objetivo**

Os pontos localizados no “joelho da curva” de “Trade - off” são uma boa estimativa para que se adote as penalizações  $W_1= 3E-5$ ,  $W_1= 1E-5$  e  $W_1 = 5E-6$ . Para este caso pode ser verificado que a cota 762 que até os dias atuais foi mantida no reservatório 75% do tempo, permaneceria 70% no primeiro caso e 90 e 95 % no demais casos.

Contudo, quando se fala em duração de uma determinada lâmina, não se fala na frequência com a mesma se apresenta. O exemplo prático desse conceito, foi o problema enfrentado pelos usuários nos últimos, cinco anos, neste período, a cota requerida pela ASUL, esteve presente apenas 30% do tempo, levando ao caos as atividades sócio econômicas.

Finalmente, desenvolveu-se um estudo que viesse modular o comportamento do reservatório, não somente for baixas durações, mas sobretudo pela frequência com as mesmas apresentam, mas para tanto, se faz necessário a definição de algumas variáveis:

Duração ( $d$ ): Representa a quantidade de vezes que ocorrem valores inferiores ao valor referencial.

Frequência ( $f$ ): Representa o número de ciclos (períodos) existentes no hidrograma, que estejam abaixo de um determinado valor.

Duração de transgressão ( $dt$ ): É a relação existente a Duração ( $d$ ) e a Frequência ( $f$ ). Assim:

$$dt = \frac{d}{f} \quad (9)$$

Frequência de transgressão media ( $\overline{ft}$ ): Relação existente a Frequência ( $f$ ) e o tamanho da amostra ( $n$ ):

$$\overline{ft} = \frac{f}{n} \quad (10)$$

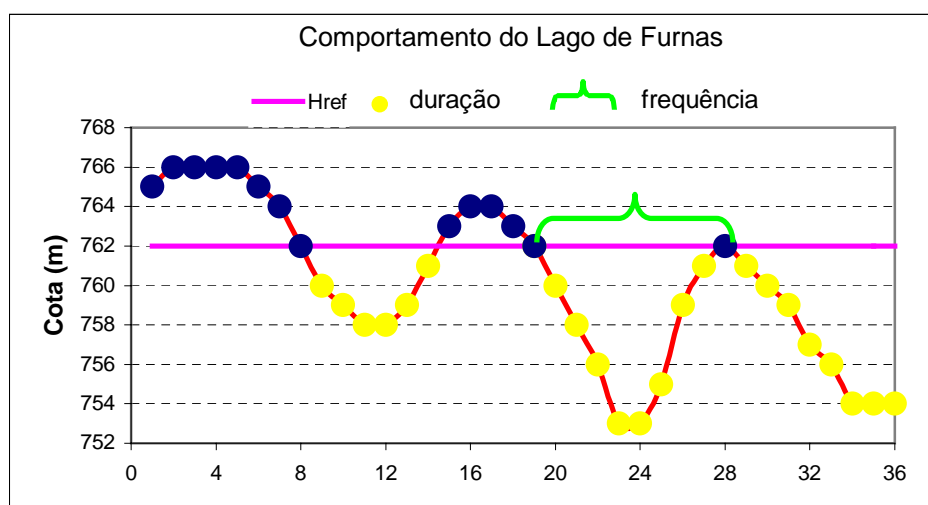
Duração máxima: Representa o maior período de tempo que o reservatório permanece com valores inferiores ao valor referencial.

Duração mínima: Representa o menor período de tempo que o reservatório permanece com valores inferiores ao valor referencial.

Constância ( $C$ ): Apresenta a assiduidade com que ocorrem valores inferiores aos valores tidos como referência, A Constância, nada mais representa que um complemento da curva de permanência, e pode ser obtido através da seguinte relação:

$$C = dt \times \overline{ft} = \frac{d}{f} \times \frac{f}{n} = \frac{d}{n} \quad (11)$$

O gráfico X exibe os dados utilizados para aplicação metodológica dos conceitos acima demonstrados.



**Gráfico 2 – Conduta do reservatório no período entre 1998 e 2000**

Assim, para o período de 36 meses estudado temos:

Duração ( $d$ ): 22 meses.

Freqüência ( $f$ ): 3 períodos.

Duração de transgressão ( $dt$ ):  $dt = \frac{d}{f} = \frac{22}{3} = 7,33$  meses por período.

Freqüência de transgressão média ( $\overline{ft}$ ):  $\overline{ft} = \frac{f}{n} = \frac{3}{36} = 0,083$  períodos / meses

Duração máxima: 8 meses.

Duração mínima: 6 meses.

Constância ( $C$ ):  $C = dt \times \overline{ft} = \frac{d}{f} \times \frac{f}{n} = \frac{d}{n} = \frac{22}{36} = 61\%$

Abaixo, tem-se uma representação gráfica da metodologia acima desenvolvida, considerando o histórico completo de dados, para cinco situações simuladas: Os três pontos indicados pelo “trade-off”, para o caso onde se deseja maior regularização de vazões ( $W_1 = 1$  e  $W_3 = 0$ ) e o comportamento real do reservatório. Vale observar, que a simulação feita utilizando o método do Cont – Varlet, apresenta as maiores durações, praticamente para todas as variações de nível do reservatório.

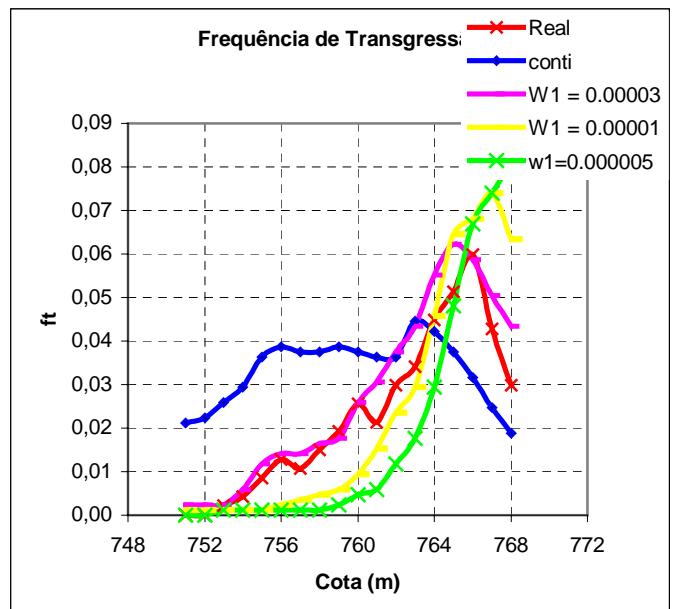
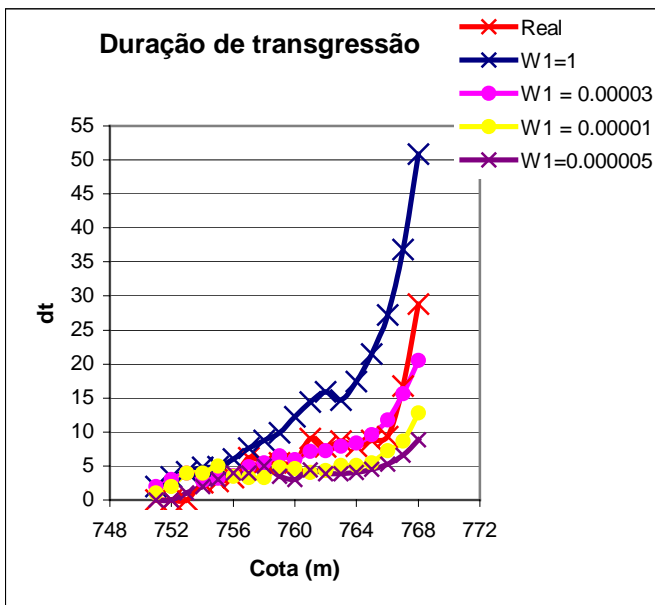


Figura 15 – Duração de transgressão

Figura 16 - Frequência de transgressão

Vale ressaltar, que se fosse imposto como política de operação do reservatório, adotando uma Frequência e Duração de transgressão média, o reservatório não iria permanecer tanto tempo com cotas baixas. Assim, caso fosse necessário adotar uma política de operação, tendo como referência, os pontos previamente sugeridos pelo “trade –off”, pode ser verificado que se fosse adotar os fatores  $W_1 = 0.00003$  e  $W_3 = 0.99997$ , não haveria grande alteração no comportamento, do reservatório, quando se compara com o que de fato aconteceu, pois ambos apresentam uma duração de transgressão alta, podendo acarretar grandes períodos de estiagem. Já os coeficientes  $W_1 = 0.000005$  e  $W_3 = 0.999995$ , demonstram que é possível o lago ficar acima da cota 765, aproximadamente 80% do tempo, ficando cheio praticamente todo período. No entanto essa prática seria de difícil aplicação, caso ocorresse um período prolongado de vazões afluentes reduzidas.



Desta maneira, ao se adotar as penalizações de  $W_1 = 0.00001$  para o desvio médio quadrático das vazões e  $W_3 = 0.99999$  para a altura, obteve-se uma melhor ponderação dos interesses de todos os usuários. Caso esse sistema tivesse sido implantado em 1963, no caso da cota 762 teríamos:

Frequência de transgressão média ( $\bar{ft}$ ):

$$\bar{ft} = \frac{f}{n} \therefore 0,023 = \frac{f}{468} \therefore f = 11 \text{ períodos}$$

Duração de transgressão ( $dt$ ):

$$dt = \frac{d}{f} \therefore 4,30 = \frac{d}{11} \therefore d = 47 \text{ meses}$$

Deve ser observado que caso fosse implementado essa metodologia, o lago teria um comportamento completamente diferente do que realmente aconteceu, ao invés de ficar 109 meses abaixo da cota 762, ficaria apenas 47 meses, garantindo em 90% do tempo haverá lâminas superiores ou iguais a essa. Outro fato a se considerado, é que quando se adota essa regra de manobra, as durações máximas serão amortizadas. Os gráficos apresentam um paralelo, de como foi comportamento do reservatório, e como deveria ser, caso as penalizações fossem adotadas.

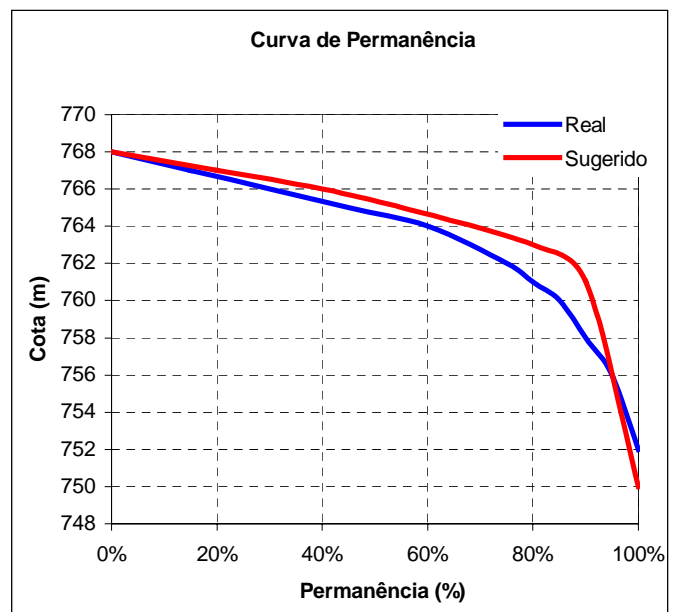
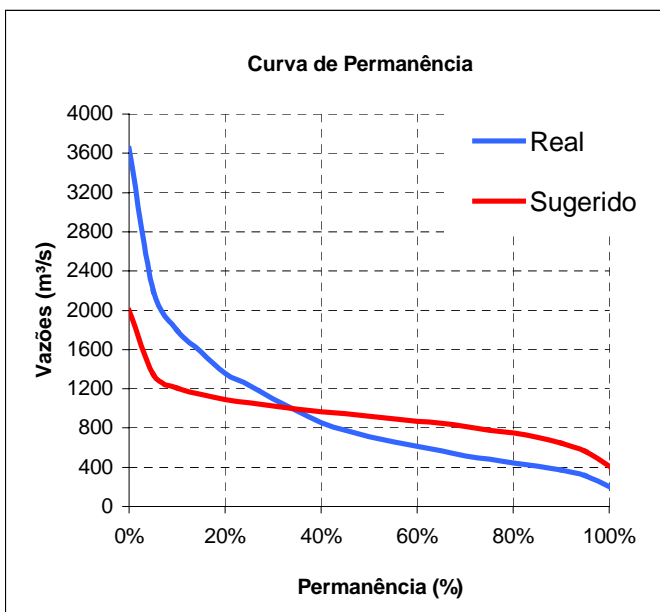


Figura 17 – Vazões defluentes Figura 18 – Níveis do reservatório: Caso real e sugerido

## CONCLUSÕES

Os estudos desenvolvidos e aplicados a UHE de FURNAS, mostram que é possível fazer uma modificação na operação do sistema elétrico brasileiro, de tal forma que se atenuem os grandes impactos sócio-econômico oriundos de deplecionamentos, que vem se apresentando com grande frequência e duração.

Neste estudo, não se levou em consideração, o impacto dessa regularização de vazões, sobre a cascata do rio Paraná e seus efeitos sobre o Sistema Interligado Nacional, no entanto foi possível observar que caso essa metodologia seja estendida a outras usinas, adicionando-se a isso a complementariedade térmica, será possível estabelecer uma política operativa que satisfaça os tanto os interesses locais como globais.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ENGEL, E., Conflitos De Uso Das Águas De Furnas, O Estado das Águas no Brasil,2001/2002, pág.107 a 109.

FURNAS Centrais Elétricas S.A - <http://www.furnas.com.br>. Acessado em 22.02.2004

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico- SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL: <http://www.ons.org.br/ons/sin/index.html> Acessado em 28.02.2004

Praia de minas: -<http://www.praiademinas.com.br>. Acessado em 15.08.2003

SANTOS, A. H. M, ALMEIDA, R. A., CABRAL, R. S., LIMA, A. M., Compensação financeira pela utilização de recursos hídricos, Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001, Porto Alegre, Ass

SANTOS, A. A. M.,(2002) Administrando Conflitos – O caso do lago de Furnas, O Estado das Águas no Brasil, pág.411 a 417.

SANTOS, A. H. M.; Bortoni, E. C.; Ribeiro Junior, L.U.; Garcia, M.A.R.A;(2003)“A exploração de reservatórios e os comitês de bacia: uma análise prospectiva para o caso da UHE de Furnas.” Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba, PR.