

Minimização do Conflito Entre a Geração de Energia Elétrica e o Controle de Cheias no Planejamento da Operação de Reservatórios I: Teoria

Igor Pinheiro Raupp, Fernanda da Serra Costa e Jorge Machado Damázio

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

raupp@cepel.br, fernanda@cepel.br, damazio@cepel.br

Recebido: 24/11/08 - revisado: 20/08/09 - aceito: 03/05/10

RESUMO

O presente artigo, de uma série de dois, apresenta três metodologias de alteração na definição dos volumes de espera para reservatórios utilizados para controle de cheias, com o intuito de aumentar a garantia de estes reservatórios conseguirem atingir o final da estação chuvosa com seus volumes úteis cheios. As propostas apresentam alterações na metodologia atualmente praticada no Planejamento da Operação de Reservatórios, realizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico. As propostas são: i) Desconsideração dos volumes de espera alocados na recessão das trajetórias críticas (período de enchimento dos reservatórios); ii) Consideração da previsão de vazão no cálculo das trajetórias crítica; e iii) Alteração dos volumes de espera no final da estação chuvosa de acordo com a vazão média mensal observada no início da estação. Para verificação da aplicabilidade e eficácia das metodologias propostas, no artigo seguinte, estas foram aplicadas à bacia do rio Paraná, considerando a proteção do ponto de controle de cheias a jusante da usina hidrelétrica de Jupia, admitindo-se algumas simplificações.

Palavras-chave: Planejamento da Operação de reservatórios, Controle de Cheias, Geração Hidrelétrica, Usos múltiplos.

INTRODUÇÃO

Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema interligado de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários (ANEEL, 2005).

Devido à grande magnitude do sistema, qualquer decisão relativa aos seus aspectos operacionais implica em diferentes consequências temporais e espaciais, tornando o problema bastante complexo. Existe, então, uma relação entre a tomada de decisão em um estágio qualquer e sua consequência futura. Se no presente optar-se por utilizar muita água na geração de energia, os níveis dos reservatórios do sistema ficarão mais baixos, assim, se ocorrer um período de aflúências baixas, aumentará o risco de déficit no atendimento de energia elétrica demandada, fazendo-se necessário o acionamento de usinas termelétricas, encarecendo, portanto, o custo da operação. Da mesma forma, se no presente optar-se por gerar energia térmica com o objetivo de armazenar energia hidráulica e no futuro ocorrer um

período de vazões altas, será necessário o vertimento de energia do sistema, o que leva a uma operação mais cara e desnecessária (Silva e Finardi, 1999).

Tendo em vista a complexidade do Sistema Interligado Nacional - SIN, é necessário que sua operação seja precedida de um planejamento, chamado de Planejamento da Operação do Sistema Interligado, executado atualmente no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, através de uma cadeia de modelos desenvolvida pelo Centro de Pesquisa de Energia Elétrica - CEPEL (Maceira et al, 2002).

Esse planejamento tem como principal objetivo a minimização do valor esperado do custo de operação (gastos com geração térmica mais penalidades pelo não atendimento da demanda) ao longo do horizonte do planejamento, levando-se em consideração restrições físicas e de confiabilidade do sistema. Adicionalmente, no Planejamento da Operação do SIN, deve-se considerar uma grande quantidade de atividades relacionadas com o uso múltiplo da água nos reservatórios em conjunção com o despacho de geração e otimização multiperíodo dos reservatórios (Silva e Finardi, 1999), como, por exemplo, o controle de cheias.

O uso dos reservatórios das usinas hidroelétricas para controle de cheias impõe restrições de defluências máximas (para impedir inundações em cidades, rodovias e pontes a jusante do reservatório) e de níveis máximos (para impedir alagamentos a montante do reservatório) à operação dos reservatórios para geração de energia elétrica. O atendimento destas restrições acarreta a necessidade de utilização de parte dos volumes úteis dos reservatórios para “amortecimento” das cheias, podendo criar um conflito, tendo em vista que a maioria dos aproveitamentos hidroelétricos não foi projetada para contemplar o controle de cheias e que cada uso procura operar os volumes do reservatório de maneira diferente. O uso para geração de eletricidade procura manter os reservatórios cheios (para poder enfrentar o período seco) enquanto que o controle de cheias precisa manter parte deles vazio, no mesmo período. Isto justifica a necessidade de uma alocação de volume de espera criteriosa e otimizada, de maneira que o conflito entre os dois usos seja minimizado.

O planejamento da operação dos aproveitamentos do SIN procura minimizar este conflito através do Plano Anual de Cheias (ONS, 2007). Esse plano, elaborado pelo ONS anualmente antes do início da estação chuvosa, define os volumes de espera para os reservatórios localizados em bacias onde existem restrições operativas de controle de cheias. A definição destes volumes está associada a um determinado risco de proteção do vale a jusante do reservatório, traduzido em termos do tempo de recorrência. A metodologia hoje em uso (Costa et al, 1999) adota uma série de recursos para melhor definir os volumes de espera, tais como: (i) Alocação sazonal dos volumes de espera durante a estação chuvosa (Kelman, 1987) para aumentar a frequência de anos nos quais os reservatórios iniciem a estação seca cheios; (ii) Abordagem estocástica no cálculo dos volumes de espera (utilização de cenários de possíveis cheias que poderiam ocorrer na bacia); (iii) Análise de Sistema de Reservatório, segundo a qual na proteção de um ponto de controle de cheia (local onde há restrição), não se considera apenas o reservatório imediatamente a montante, mas todos a montante do ponto de controle (Damázio, 1988); e (iv) Consideração de informações macro-climáticas (El niño, La niña) para a geração dos cenários de possíveis cheias. (Costa et al, 1996).

Apesar da alocação sazonal, em alguns anos, os reservatórios podem não conseguir chegar ao final da estação chuvosa plenamente cheios, devido a não afluência de vazões capazes de preencher os volumes de espera alocados para esse período.

O objetivo deste artigo é descrever aprimoramentos da metodologia de definição dos volumes de espera que buscam minimizar os volumes de espera. Um segundo artigo utiliza as metodologias para verificar sua aplicabilidade e eficiência.

METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE VOLUMES DE ESPERA

Desde 1997, a metodologia adotada na elaboração do Plano Anual de Cheia para o cálculo dos volumes de espera a serem alocados nos reservatórios do SIN se baseia na Teoria das Condições de Controlabilidade (Damázio et al, 1994). Esta teoria é uma extensão do método das Trajetórias Críticas (Kelman, 1987) para sistemas com múltiplos reservatórios e múltiplos pontos de controle de cheias.

O Método das Trajetórias Críticas funciona como um balanço hídrico entre a quantidade de água que chega ao reservatório (vazão afluente), a máxima vazão que este pode defluir, de acordo com a sua restrição de controle de cheia (vazão de restrição), e a capacidade deste em alocar volumes vazios para amortecer as cheias (volume de espera), caso haja necessidade, observando o seu estado (quantidade de água armazenada) no instante anterior. O estado do reservatório no instante anterior, na realidade, representa o estado do reservatório no dia seguinte (t) ao que se está calculando o volume de espera ($t-1$), uma vez que, esse método emprega um algoritmo recursivo no sentido contrário do tempo, ou seja, o cálculo é feito a partir do último dia da estação chuvosa (T) até o primeiro dia. O cálculo é feito através da seguinte equação:

$$VE(t-1,s) = \max[0, (\Delta Q \times \Delta t) + VE(t,s)] \quad t = T, \dots, 1 \quad (1)$$

$$\text{Sendo: } \Delta Q = Q_{AFL}(t-1,s) - Q_R \quad (2)$$

$$VE(T,s) = 0$$

$VE(t,s)$ - volume de espera para o final do t -ésimo dia da s -ésima estação chuvosa;

T - último dia da estação chuvosa;

$Q_{AFL}(t,s)$ - vazão média diária afluente do t -ésimo dia da s -ésima estação chuvosa;

Q_R - vazão de restrição;

Δt - número de segundos em um dia.

Calculando os volumes de espera para todos os dias da estação chuvosa de um ano, tem-se a trajetória crítica (alocação de volume vazio ao longo do

período considerado) para este ano. Considera-se como trajetória crítica correspondente a uma dada seqüência de aflúências diárias durante a estação chuvosa a curva que define para cada instante de tempo (dia) ao longo da estação chuvosa o menor volume vazio a ser alocado em um reservatório que garante que não seja necessário defluir mais do que a vazão de restrição daquele instante até o final da estação chuvosa.

Os volumes de espera definidos na trajetória crítica garantem a proteção do vale a jusante do reservatório para a seqüência de aflúências diárias considerada. Porém, como os volumes de espera são definidos antes do início da estação chuvosa, não é possível saber qual será a seqüência de aflúências diárias que irá ocorrer durante esta estação. Esse problema é de natureza estocástica, devido à aleatoriedade das vazões.

Uma forma de tratar este problema é considerar um conjunto de cenários de aflúências diárias possíveis de ocorrer na estação chuvosa de um ano qualquer, fazendo uso de um modelo estocástico de geração de cenários sintéticos de vazões diárias (modelo DIANA, Kelman et al, 1983). Para cada um dos cenários é então calculada sua trajetória crítica correspondente.

Se o objetivo for fornecer 100% de proteção, dado este conjunto de cenários, deve-se definir a envoltória das trajetórias críticas. Esta envoltória é calculada através da equação (3), fornecendo uma curva limite, que fornece para cada dia da estação chuvosa o volume de espera necessário para garantir que para qualquer dos cenários considerados, o ponto de controle associado ao reservatório estará protegido.

$$ENV(t) = \max[VE(t, c); c = 1, \dots, n]; t = 1, \dots, T \quad (3)$$

Sendo:

ENV(t) – envoltória para o t-ésimo dia;

n – número de cenários considerados no cálculo da envoltória.

Caso não se deseja proteger o vale a jusante para todo o conjunto de cenários gerados, pode-se associar a proteção do vale a um determinado risco, ou seja, admite-se que um determinado número de cenários (os de mais difícil ocorrência, selecionados por algum critério) não serão protegidos caso ocorram. Sendo assim, se a proteção do vale for associada a um determinado risco não há necessidade de garantir que a vazão defluente não ultrapasse a vazão de restrição para todos os cenários. O número

de cenários, para os quais não será garantido que a vazão defluente não ultrapasse a vazão de restrição, é função do risco (tempo de retorno) e pode ser expresso como:

$$\bar{N} = \frac{N_{SS}}{TR} \quad (4)$$

Sendo:

\bar{N} - número de cenários que não serão protegidos;

N_{SS} – número total de cenários sintéticos considerados;

TR – Tempo de retorno (em anos) admitido para o estudo;

Definido o número de cenários que não serão protegidos (\bar{N}), deve-se escolher um critério para o descarte destes cenários que não serão levados em consideração no cálculo da envoltória. Atualmente, são utilizados dois critérios: máximo reenchimento (França & Canella, 1994) e máxima flecha (Kelman, 1987).

Para efeito das metodologias propostas neste artigo, o critério mais indicado é o de máximo reenchimento, associado à maximização da probabilidade de recuperação dos volumes de espera, pois descarta os cenários que requerem vazões afluentes maiores para garantir que o reservatório chegue ao final da estação chuvosa cheio. De acordo com esse critério, a variável que irá definir quais cenários serão descartados é a máxima tangente, de acordo com a expressão:

$$T_{MÁX}(c) = \max \left[\frac{VE(t, c)}{\Delta t}; t = 1, \dots, T \right]; c = 1, \dots, N_{SS} \quad (5)$$

$$\text{Sendo: } \Delta t = (T + 1) - t \quad (6)$$

$T_{MÁX}(c)$ – Tangente máxima do c-ésimo cenário;

Os \bar{N} cenários a serem descartados serão aqueles que apresentarem os maiores valores para a tangente máxima.

De maneira simplificada, as etapas para cálculo das envoltórias de volume de espera são:

1. Geração dos cenários sintéticos de aflúências;
2. Cálculo das trajetórias críticas dos cenários;
3. Seleção dos cenários que serão protegidos, de acordo com o tempo de retorno definido;

4. Cálculo da envoltória, desconsiderando os cenários que não serão protegidos.

PROPOSTAS DE APRIMORAMENTOS DA METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE VOLUMES DE ESPERA

Uma preocupação recorrente no setor elétrico é aumentar a garantia de reservatórios cheios ao início da estação seca, pois o volume de água não disponível no início desta estação pode levar a dificuldades de atendimento da demanda de energia elétrica neste período. Entretanto, como uma das regras da operação de controle de cheias é respeitar os volumes de espera sempre que não estiverem ocorrendo cheias (ONS, 2007b), pode acontecer de numa estação chuvosa a combinação da manutenção dos volumes de espera planejados para o período final da estação com a não ocorrência de cheias neste período, resulte no não enchimento pleno dos reservatórios.

Neste item são apresentadas três propostas metodológicas cujo objetivo é aumentar a chance de iniciar a estação seca com os reservatórios do setor elétrico, utilizados para controle de cheias, plenamente cheios. De uma forma geral, as propostas procuram calcular volumes de espera menores preservando-se o risco desejado, através de:

- Forma de cálculo mais eficiente das trajetórias críticas (proposta 1);
- Uso de previsão de aflúências no cálculo das trajetórias críticas (proposta 2); e
- Uso de informações hidrológicas dos meses já transcorridos para alteração dos volumes de espera nos meses finais da estação chuvosa (proposta 3).

Proposta 1: Alteração no Cálculo das Trajetórias Críticas

Esta primeira abordagem consiste na alteração no cálculo das trajetórias críticas de forma que os volumes referentes à recessão de volume de espera da trajetória crítica (vide Figura 1) de cada cenário sintético sejam desconsiderados (Raupp, 2008). Consideramos como a recessão da trajetória crítica a parte desta curva onde ocorre a diminuição de volume de espera a ser alocado no reservatório, isto é, do instante de tempo onde ocorre, na curva, o vo-

lume de espera máximo (t^*) até o instante de tempo em que o volume de espera da curva atinge o valor zero (t_{FIM}), conforme indicado na Figura 1. Ainda nesta figura, o instante de tempo (T) é considerado como o último dia da estação chuvosa considerada para o cálculo da curva de volume de espera, ou seja, o último dia do período em que se considerou aflúência.

Esta proposta tem como princípio o critério para o cálculo das trajetórias críticas, segundo o qual a vazão defluente deve ser mantida igual à vazão de restrição durante todo o período em que as vazões afluentes são maiores que a restrição. De acordo com a equação (1), referente à recursão para o cálculo da trajetória crítica, a partir do instante de tempo (t^*) associado ao volume de espera máximo, defluindo-se a vazão de restrição, obtém-se exatamente os volumes correspondentes à trajetória crítica sem que estes volumes estejam previamente alocados. Vale ressaltar que estes volumes só serão necessários caso ocorra a cheia em questão. Portanto, para controlar esta cheia, basta que estejam disponíveis, ao início da estação chuvosa, os espaços vazios até o instante de volume de espera máximo, a partir deste instante, a própria regra de operação do método das trajetórias críticas garantirá a segurança e também o enchimento do reservatório, caso esta seqüência de aflúências ocorra. A não alocação prévia destes volumes é uma forma mais eficiente de cálculo da trajetória crítica, pois diminui a necessidade prévia de volume de espera na trajetória de cada cenário.

No cálculo da trajetória crítica e da envoltória serão considerados cenários sintéticos de aflúências diárias gerados por um modelo de geração de cenários sintéticos de aflúências, similar à metodologia atualmente praticada.

Os três passos a seguir descrevem o procedimento para um dado cenário com uma cheia:

1. Cálculo da trajetória crítica para todo o período, de acordo com a equação (1);
2. Começando no instante $t = 0$ (início da estação chuvosa), verificar em que instante a vazão afluente (Q_{AFL}) se iguala a vazão de restrição (Q_R). Este instante (t^*) corresponde ao volume de espera máximo;
3. Definindo-se t_{FIM} o instante final da cheia, ou seja, o último dia em que a aflúência é maior que a vazão de restrição, fazer $VE(t) = 0 \quad t^*+1 \leq t \leq t_{FIM}$.

O procedimento descrito acima, aplicado à cheia hipotética da Figura 1, produz a curva de vo-

lumes de espera da Figura 1b. Comparando-se as trajetórias críticas das Figuras 1a e 1b pode-se observar a diferença na alocação de volume de espera.

É possível que na seqüência de aflúencias de um cenário ocorra mais de uma cheia. Se os volumes de espera necessários para proteger cada uma delas forem independentes, isto é, a trajetória crítica apresente valores nulos de volume de espera entre as cheias, então, deve-se seguir o mesmo procedimento descrito posteriormente, considerando cada cheia isoladamente.

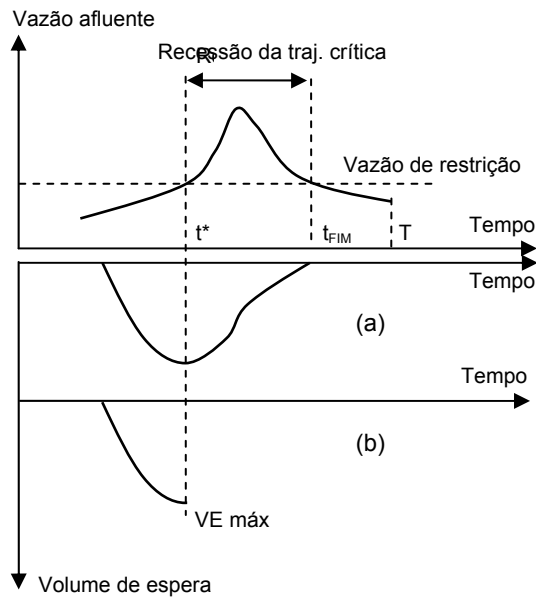


Figura 1 - Hidrógrafa de um cenário hipotético e as trajetórias críticas (a) praticada e (b) a calculada segundo proposta 1.

Existem casos especiais para os quais a seqüência de aflúencias apresenta duas ou mais cheias consecutivas, porém sua trajetória crítica não atinge o valor nulo entre elas, mas apenas após a ocorrência de todas as cheias (Figura 2a). Isto significa que não se trata de duas cheias independentes, pois antes da vazão da primeira cheia alcançar valor inferior à vazão de restrição, já é necessário esvaziar o reservatório para alcançar o volume de espera máximo (VE máx) correspondente a cheia seguinte, em t^*_2 . Quando isto ocorre, o instante a partir do qual pode-se desconsiderar os volumes de espera será o correspondente ao volume de espera máximo associado ao último pico (t^*_2 na Figura 2), ou seja, quando a vazão afluente da última cheia se iguala a vazão de restrição. Assim, garante-se o volume de espera necessário para alocar todas as cheias.

Calculadas as trajetórias críticas do conjunto de cenários sintéticos de aflúencias seguindo o procedimento proposto, as envoltórias são obtidas normalmente conforme Figura 3.

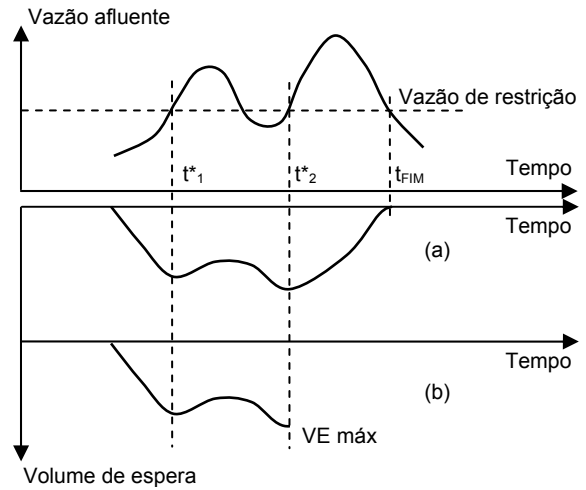


Figura 2 - Hidrógrafa de um cenário hipotético com dois picos de cheias e a necessidade de volume de espera (a) calculada pelo método praticado e (b) pela proposta 1.

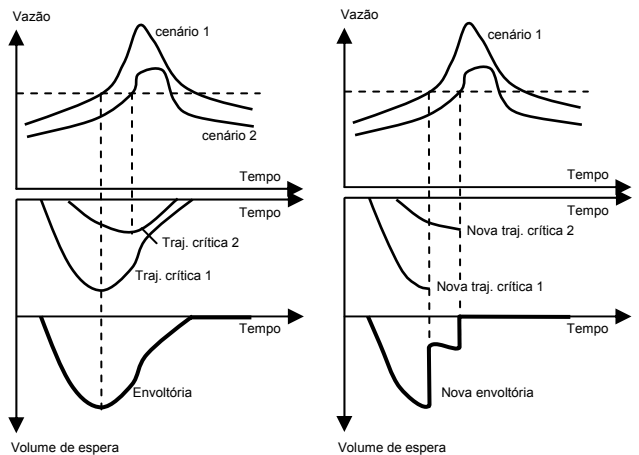


Figura 3 - Diferença nas envoltórias com trajetórias críticas calculadas pela metodologia praticada e pela proposta 1.

Nos passos listados a seguir, destacam-se em itálico as modificações ao método das trajetórias críticas para desconsiderar as recessões:

1. Geração dos cenários sintéticos de aflúencias;
2. Cálculo das trajetórias críticas dos cenários;

3. *Alteração das trajetórias críticas para desconsiderar as recessões conforme descrito;*
4. Seleção dos cenários que serão protegidos, de acordo com o tempo de retorno definido;
5. Cálculo da envoltória, desconsiderando os cenários que não serão protegidos.

Proposta 2: Consideração da Previsão de Vazões no Cálculo das Trajetórias Críticas

A proposta de consideração da previsão de vazões altera o cálculo das trajetórias críticas com base no uso da previsão de aflúencias (Raupp, 2008 e Raupp et al, 2008).

Suponhamos que seja possível obter a previsão das aflúencias a um reservatório com um horizonte de "d" dias com 100% de acerto (previsão perfeita). Se a antecedência de "d" dias for suficiente para prever a cheia e ainda criar os espaços vazios necessários para armazenar a parcela das aflúencias acima da vazão de restrição, esta informação poderia ser utilizada para reduzir a necessidade de alocação prévia de volume de espera. Neste caso, não seria necessário alocar previamente os volumes de espera, pois, quando a previsão das aflúencias indicasse vazões superiores à vazão de restrição, estes volumes seriam, então, alocados. Caso contrário, o reservatório poderia ser operado sem considerar estes volumes de espera.

Conseqüentemente, quanto maior for o horizonte da previsão, maior será o impacto desta informação na redução da alocação prévia de volume de espera.

O procedimento consiste em, analisando a cheia de maneira recursiva (de t_{FIM} até t_0), determinar o instante t^* em que será possível prever o final da cheia. A partir deste instante, o volume de espera a ser alocado previamente poderá ser anulado, pois, caso esta cheia ocorra, o volume de espera alocado previamente no reservatório até o instante t^* , juntamente com o conhecimento (através da previsão) da seqüência de aflúencias que ocorrerão no período t^* a t_{FIM} , permitirá a proteção destas aflúencias. Os três passos a seguir resumem o procedimento para um dado cenário com uma única cheia (conforme Figura 4):

1. Cálculo da trajetória crítica para todo o período, de acordo com a equação 1;
2. Fazer $t^* = t_{FIM} - d_{PREV}$;
3. Fazer $VE(t) = 0 \quad t^* + 1 \leq t \leq t_{FIM}$.

Sendo:

d_{PREV} – Horizonte da previsão (em dias)

Deve-se atentar para o caso em que duas ou mais cheias sucessivas resultam em uma mesma curva de volume vazio, sem que o volume de espera se anule entre as cheias. Neste caso, a modificação da trajetória crítica ocorrerá apenas no período final (referente a última cheia), uma vez que, parte do espaço vazio (volume de espera) alocado no reservatório durante a primeira cheia se deve ao seu esvaziamento para se prevenir da próxima cheia (vide Figura 5).

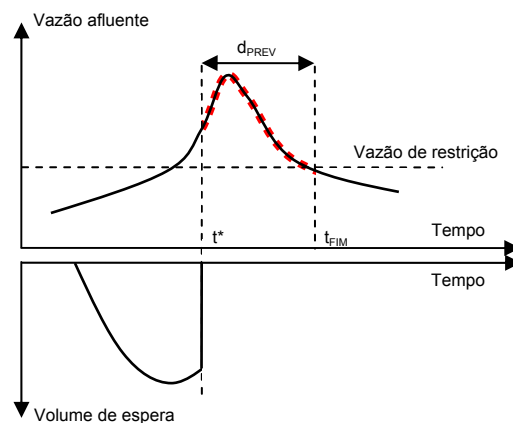


Figura 4 - Hidrógrafa de um cenário hipotético e a trajetória crítica correspondente obtida segundo proposta 2.

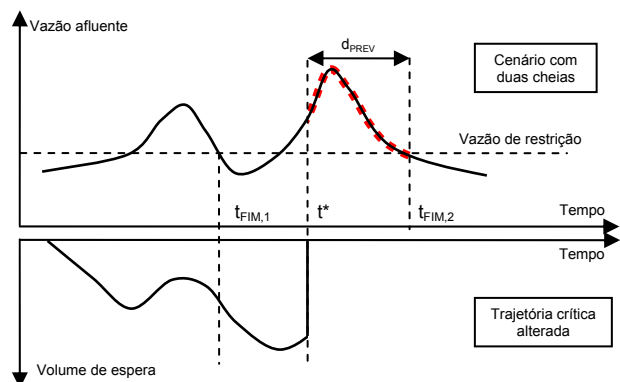


Figura 5 - Hidrógrafa de um cenário hipotético com dois picos de cheias e a trajetória crítica calculada pela proposta 2.

Calculadas as trajetórias críticas para todos os cenários, a envoltória é obtida segundo a equação

(3). Caso a proteção esteja associada a um determinado risco (tempo de retorno) pode-se adotar qualquer um dos dois critérios de descarte de trajetórias críticas.

Nos passos listados a seguir, destacam-se em itálico as modificações propostas ao método das trajetórias críticas para se considerar as previsões de afluições:

1. Geração dos cenários sintéticos de afluições;
2. Cálculo das trajetórias críticas dos cenários;
3. *Alteração das trajetórias críticas de acordo com a duração da previsão de vazões considerada;*
4. Seleção dos cenários que serão protegidos, de acordo com o tempo de retorno definido;
5. Cálculo da envoltória, desconsiderando os cenários que não serão protegidos.

Proposta 3: Alteração dos Volumes de Espera no Final da Estação Chuvosa de Acordo com a Informação Hidrológica do Início da Estação

De acordo com Costa et al, 1996, as informações hidrológicas dos meses anteriores ao início da estação chuvosa não são variáveis capazes de indicar o comportamento das cheias durante a estação. Por outro lado, a metodologia atual faz uso de informações macro-climáticas (El niño, La niña), para melhor definir os volumes de espera para a estação chuvosa que está por vir (Costa et al, 1996). Mais recentemente, alguns estudos apresentaram sucesso ao fazer uso de alguma informação hidrológica do início da estação chuvosa em curso com o objetivo de antecipar a recuperação dos volumes de espera (ONS, 2005 e ONS, 2006).

A metodologia a seguir, tem por objetivo utilizar informações hidrológicas dos meses já transcorridos da estação chuvosa em curso para inferir sobre o comportamento das cheias dos próximos meses (Raupp, 2008). A estação chuvosa é então dividida em dois períodos: meses iniciais e meses finais.

Caso seja possível identificar uma relação entre as vazões médias mensais dos meses iniciais da estação com o comportamento das cheias nos meses finais, os volumes de espera planejados para os meses finais poderiam, então, ser alterados de acordo com esta informação. Isto permitiria a antecipação do enchimento do reservatório caso estas informações indicassem menor necessidade de volumes de

espera que o planejado, o que poderá diminuir o risco de iniciar a estação seca sem que o reservatório esteja plenamente cheio.

Pelo exposto acima a metodologia proposta possui duas etapas:

1. Identificar a informação hidrológica dos meses iniciais que permita antever o comportamento das cheias nos meses finais da estação chuvosa;
2. Alterar o cálculo das envoltórias dos meses finais da estação chuvosa condicionando os valores dos volumes de espera a esta informação.

1- Identificação da informação hidrológica

Uma técnica estatística que pode ser utilizada para identificar a informação hidrológica dos meses iniciais que melhor explique o comportamento das cheias nos meses finais da estação chuvosa é a análise de correlação. Neste caso, o comportamento das cheias nos meses finais poderia ser representado pelas vazões máximas de diferentes durações (em dias) ou o próprio volume de espera máximo dos meses finais da estação e a informação hidrológica dos meses iniciais poderia ser a vazão média mensal desses meses.

Sendo assim, a matriz de correlação cruzada entre as vazões médias mensais dos meses iniciais da estação chuvosa (informação hidrológica dos meses iniciais) e a vazão máxima de duração d dias dos meses finais da estação indicaria qual o conjunto de meses iniciais apresenta a maior relação com o comportamento das cheias no final da estação chuvosa.

Após a identificação das vazões médias mensais que apresentem melhor relação com o comportamento das cheias no final do período, pode-se utilizar esta informação agrupando em classes as ocorrências de cheias nos meses finais em função da vazão média mensal dos meses anteriores. Para tal é necessário estabelecer os valores limites para as vazões médias mensais que definem a estrutura de classes para a vazão média mensal dos meses iniciais que indicam maior ou menor necessidade de volumes de espera nos meses finais.

Uma técnica estatística indicada para esta classificação é a da árvore de regressão (Mathsoft, 1999; Braun e Maindonald, 2003 e Ripley, 1996), que se baseia em técnicas de análise exploratória de dados para problemas onde a estrutura dos dados é desconhecida (oculta) e a quantidade de informação é grande. Tais modelos particionam o espaço

de observações, que é formado por variáveis de entrada (explicativas) e de saída (resposta), em subconjuntos, cujos elementos pertencem a uma determinada classe. Em outras palavras, estes modelos procuram características das variáveis de entrada que são importantes na definição dos agrupamentos das variáveis de saída semelhantes. Desta maneira, é possível agrupar as vazões máximas diárias dos meses finais da estação (ocorrência de cheias) a partir dos valores de vazão média mensal (classes de vazões médias mensais) dos meses iniciais.

A árvore de regressão é representada graficamente através de uma árvore (vide Figura 6), que é composta por nós ou vértices que são ligados através de arestas ou arcos.

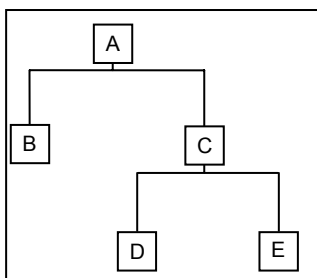


Figura 6 - Representação da árvore de regressão.

Na Figura 6, a raiz da árvore (nó inicial) é o nó A, que possui duas sub-árvores, cujas raízes são os nós B e C, chamados filhos de A. Os nós que não possuem filhos (nós B, D e E) são chamados de folhas, os demais, são chamados de nós internos. Uma folha representa um valor ou uma classe para a variável de saída e o número de folhas corresponde o número de classes em que o espaço de observação está dividido. Um nó interno representa um teste lógico que avalia qual será o próximo nó descendente ou filho a ser seguido, isto é, representa um critério de decisão para divisão dos subconjuntos.

Quando se tenta estabelecer a classe ou o valor da variável dependente para um determinado caso, ele é primeiramente testado na raiz. Dependendo do resultado do teste lógico usado no nó, a árvore ramifica-se para um dos nós filhos e este procedimento é repetido até que um nó terminal (folha) seja alcançado. Como a árvore é um conjunto finito de nós, tem-se que este processo resulta em uma folha e, portanto, numa classe ou valor para a variável dependente.

O crescimento da árvore baseia-se em algoritmo de particionamento, que em cada nó divide os dados em classes, tendo como critério uma ou mais

variáveis explicativas. O número de classes (ou folhas) poderá ser determinado por:

- Homogeneidade das classes em termos de variável resposta;
- Número mínimo de elementos dentro das classes;
- Poda de galhos da árvore segundo uma medida de custo-complexidade, eliminando as partições (nós) que implicam em pouca melhoria, diminuindo a complexidade da árvore.

2- Alteração do cálculo das envoltórias

A metodologia proposta consiste em substituir a envoltória única nos meses finais da estação chuvosa, por um conjunto de envoltórias, uma para cada classe de vazão média mensal verificada nos meses anteriores. Com base na informação hidrológica verificada nos meses iniciais, no primeiro dia da parte final da estação, adota-se a envoltória associada à classificação da informação hidrológica passada. Define-se assim uma data para a tomada de decisão (Raupp, 2008). Desta forma, a envoltória a ser calculada apresentaria a forma ilustrada na Figura 7, admitindo-se que as vazões médias mensais dos meses iniciais da estação fossem agrupadas em três classes através da técnica de árvores de regressão.

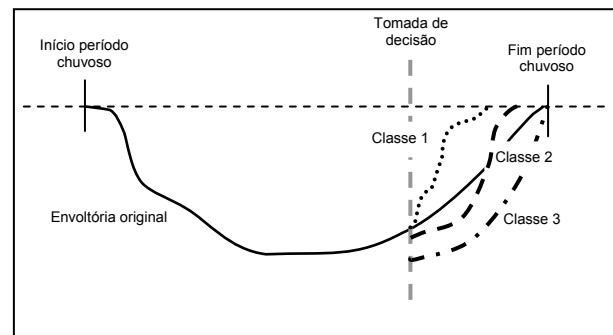


Figura 7 – Representação esquemática da envoltória resultante da metodologia proposta para uso de informação hidrológica no cálculo dos volumes de espera.

Supondo que a classificação resultante seja formada de três classes, vazões Altas, Médias e Baixas, então, para cada um dos conjuntos de anos da série histórica de vazões diárias estimam-se os parâmetros do modelo estocástico de geração de cenários sintéticos de vazões diárias. A partir de cada conjunto de parâmetros geram-se três conjuntos de cenários sintéticos de vazões diárias condicionados

às estas classes. O número de cenários sintéticos de cada conjunto deve ser proporcional ao número de séries históricas de cada classe. A soma dos cenários dos três conjuntos deve ser igual ao número total de cenários sintéticos que seria adotado pela metodologia sem a classificação das vazões do início da estação chuvosa.

Após a geração dos cenários sintéticos, calculam-se as trajetórias críticas correspondentes e, considerando um risco definido à priori, calcula-se a envoltória para toda a estação chuvosa. O cálculo das trajetórias críticas, o critério de descarte de cenários que não serão protegidos e o cálculo da envoltória seguem o mesmo procedimento da metodologia.

Os valores de volumes de espera para o período inicial da estação chuvosa correspondem aos valores da envoltória calculados conforme descrito acima (envoltória tradicional). Para o período final da estação, esta envoltória é substituída por três outras, cada uma correspondente a uma classe. Para calcular a envoltória associada a cada classe no final da estação chuvosa, devem-se verificar quais cenários de cada classe não foram protegidos neste período pela envoltória tradicional e, então, para cada classe, calcular a envoltória do seu conjunto de trajetórias críticas descartando-se aqueles mesmos cenários que não foram protegidos pela envoltória tradicional e que pertenciam a classe correspondente. Os passos a seguir resumem a metodologia proposta:

Sejam:

NH - Número de anos da série histórica de vazões diárias;

n - Número de classes que a envoltória do final da estação chuvosa será dividida;

N_{SS} - Número total de cenários sintéticos de vazões diárias.

1. Geração dos N_{SS} cenários sintéticos de vazões diárias condicionadas às classes de vazões médias mensais do período inicial da estação chuvosa:
 1. Dividir as NH séries históricas de vazões diárias em n conjuntos, de acordo com a vazão média mensal do período inicial da estação chuvosa ($NH_i, i = 1, \dots, n$);
 2. Estimar os n conjuntos de parâmetros do modelo de geração de cenários sintéticos de vazões diárias, um para cada classe, a partir dos n conjuntos de séries históricas, obtidos no item 1.1;
 3. Gerar N_i ($i = 1, \dots, n$) cenários sintéticos de vazões diárias a partir de cada conjun-

to de parâmetros calculados no item 1.2, sendo:

$$N_i = N_{SS} \times \frac{NH_i}{NH}, i = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n N_i = N_{SS} \quad (8)$$

1. Cálculo das trajetórias críticas dos N_{SS} cenários sintéticos para toda a estação chuvosa;
2. Seleção dos \bar{N} cenários que não serão protegidos, de acordo com o tempo de retorno definido;
3. Cálculo da envoltória para toda a estação chuvosa, desconsiderando os cenários que não serão protegidos;
4. Determinação de quais dos \bar{N} cenários não são protegidos no final da estação chuvosa (\bar{N}_{FIM}^i) e a que classe pertencem ($\bar{N}_{FIM}^i, i = 1, \dots, n$);
5. Cálculo das envoltórias para o final da estação chuvosa para cada classe, não protegendo os \bar{N}_{FIM}^i cenários sintéticos.

A título de comparação, as modificações da proposta 3 referem-se aos itens 1, 5 e 6, anteriormente apresentados.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste artigo foram propostas três metodologias com o intuito de aumentar a garantia dos reservatórios atingirem o final da estação chuvosa cheios.

A primeira proposta, denominada Alteração no Cálculo das Trajetórias Críticas, consiste em alterar o cálculo das trajetórias críticas desconsiderando a parte associada à recessão destas trajetórias, o que resulta em uma envoltória com menor requisito prévio de volumes de espera. Esta alteração não altera o risco para todo o período, uma vez que, seguindo a regra de manter a vazão defluente igual à vazão de restrição nos instantes em que a vazão afluyente é maior que a restrição, já faz com que o volume vazio no reservatório seja o mesmo do calculado para a trajetória crítica mesmo que estes volumes não estejam considerados na trajetória.

A segunda proposta, denominada Consideração da Previsão de Vazões no Cálculo das Trajetórias Críticas, consiste em reduzir a alocação prévia de volume de espera caso se disponha de uma previsão de vazão perfeita com um horizonte de d dias. Essa redução é viável, pois com o conhecimento das vazões futuras (previsão) e com o volume de espera alocado para o instante a partir do qual se pode prever até o final da cheia, é possível alocar o volume de espera no reservatório para o período previsto, se necessário. Cabe ressaltar que a eficiência desta proposta está diretamente condicionada à: (i) Qualidade da previsão de aflúncias diárias; e (ii) Relação entre a duração das cheias e o horizonte máximo (seqüência máxima de número de dias) de previsão das aflúncias diárias, ou seja, antecedência da previsão.

Seria interessante estudar a possibilidade de utilização de previsões que possuem algum erro, ou seja, previsões que não possuem 100% de acerto. A dificuldade de consideração deste tipo de previsão é quanto à mensuração da probabilidade de acerto e de como será a utilização deste erro de previsão na metodologia de cálculo do volume de espera. Acredita-se que considerar este tipo de previsão poderia resultar em um aumento do número de cenários que deveriam ser protegidos no cálculo da envoltória, com o intuito de manter o risco pré-definido.

A terceira proposta, denominada Alteração dos Volumes de Espera no Final da Estação Chuvosa de Acordo com a Hidrologia do Início da Estação, não modifica o cálculo das trajetórias críticas, mas propõe alterar a envoltória em uma data fixa no período final da estação (tomada de decisão), considerando informações hidrológicas dos meses anteriores a esta data. Desta maneira, seria adotado uma envoltória otimizada de acordo com as características hidrológicas da cheia em curso, não alocando, por exemplo, uma envoltória com muita necessidade de volume de espera para uma estação com vazões baixas.

Embora, neste artigo, as metodologias propostas tenham sido desenvolvidas considerando o caso mais simples, que consiste em um sistema com um ponto de controle de cheias e um reservatório, elas podem ser diretamente aplicadas a algumas situações reais do SIN, como é o caso do controle de cheias a jusante das UHE's Boa Esperança, no rio Parnaíba e Três Marias, no Rio São Francisco. Nestes casos, o controle de cheias considera apenas o reservatório imediatamente a montante do ponto de controle de cheias para alocação de volume de espera e proteção deste ponto de controle, não necessitando, portanto, de extensão das metodologias para

sistemas com múltiplos reservatórios e múltiplos pontos de controle.

Na parte 2 deste artigo (Raupp et al, in press2), com o intuito de verificar a aplicabilidade e a eficácia das metodologias, estas foram aplicadas na bacia do rio Paraná. Como esta bacia é um sistema com múltiplos reservatórios e múltiplos pontos de controle, foi feita uma simplificação, considerando a bacia como um reservatório equivalente até o ponto de controle a jusante da UHE Jupia.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2005, *Atlas de Energia Elétrica no Brasil – 2ª edição*, Brasília, Brasil.
- BRAUN, J., MAINDONALD, J., 2003, "Data Analysis and Graphics Using R", *Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics*, Cambridge Press.
- COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., GHIRARDI, A.O., 1996, "Incorporação de Tendências Macro-climáticas na Operação de Controle de Cheias", Relatório Técnico Cepel, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., NEVES, F.P., GHIRARDI, A.O., 1999, "Sistema SPEC – Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias em Sistemas Hidroelétricos", XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, MG, Brasil, Novembro.
- DAMÁZIO, J.M., 1988, Condições de Controlabilidade de Sistemas de Reservatórios para Controle de Cheias e seu Uso na Operação de Sistemas com Múltiplos Usos, Tese de D.Sc., COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
- DAMAZIO, J.M., MARIEN, J.L., COSTA, F.S., 1994, "Building Flood Control Rules Curves for Multipurpose Multi-reservoirs System Using Controllability Conditions". *Water Resources Research*, Vol. 30, Nº4, Pp. 1135-1144, Abril.
- FRANÇA, E.H.F., CANELLA, S.D., 1994, "Análise Comparativa entre Possíveis Curvas de Alocação de Volumes de Espera", III Encontro Técnico de Hidrologia Operacional, Itaipava, RJ, Brasil.
- KELMAN, J., DAMÁZIO, J.M., COSTA, J.P., 1983, "Geração de Séries Sintéticas de Vazões Diárias – Modelo Diana", *Revista Brasileira de Engenharia*, Vol.1, Nº 2, Pp. 5-22.
- KELMAN, J., 1987, "Cheias e Aproveitamentos Hidroelétricos", *Revista Brasileira de Engenharia*, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- MACEIRA, M.E.P., TERRY, L.A., COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., MELO, A.C.G., 2002, "Chain of Optimization Models for Setting the Energy Dispatch and Spot

- Price in the Brazilian System”, XIV Power Systems Computation Conference - PSCC, Seville, June
- MATHSOFT, 1999, S-Plus 2000, Guide to Statistics, Vol.1, Data Analysis Products Division, Math Soft, Seattle, WA.
- ONS, 2005, Metodologia para Revisão dos Volumes de Espera do Reservatório de Três Marias, Rio de Janeiro, RJ, Novembro.
- ONS, 2006, Metodologia para Revisão dos Volumes de Espera do Reservatório de Boa Esperança, Rio de Janeiro, RJ, Março.
- ONS, 2007, Submódulo 9.3 – Planejamento Anual de Prevenção de Cheias, Rio de Janeiro, RJ, Setembro.
- ONS, 2007b, Submódulo 9.4 – Estabelecimento das Regras para Operação de Controle de Cheias, Rio de Janeiro, RJ, Setembro.
- RAUPP, I.P., 2008, Minimização do Conflito entre a Geração de Energia Elétrica e o controle de Cheias no Planejamento da Operação de Reservatórios, Dissertação de M.Sc., COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- RAUPP, I.P., COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., 2008, “Uso da Previsão de Vazões para Minimização do Conflito entre a Geração de Energia Elétrica e o Controle de Cheias no Planejamento da Operação de Reservatórios”, II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Outubro.
- RIPLEY, B.D., 1996, “Pattern Recognition and Neural Networks”, Cambridge University Press.
- SILVA, E.L., FINARDI, E.C., 1999, Curso de Planejamento de Sistemas Hidrotérmicos, Projeto CEPEL, ASMAE, UFSC, Novembro.

end of the rainy season according to the average monthly flow observed in the initial months of the season. In the next article, all methodologies proposed were tested in the River Paraná basin to check their applicability and effectiveness.

Key-words: *Reservoir Operation Planning, Flood Control, Hydroelectric Generation, Multiple Uses.*

Minimization Of The Conflict Between Electric Power Generation And Flood Control In Reservoir Operation Planning I

ABSTRACT

One of the particularities of the Interconnected Brazilian Hydrothermal System operation planning is the need to use part of the volumes of the hydroelectric plants reservoirs as waiting volumes for attenuation of possible floods. These volumes are calculated through the Flood Prevention Studies, based on the Critical Paths of the synthetic flow scenarios. The use of the reservoir volumes for electricity generation and flood control is subject to conflict, since the former attempts to keep the reservoirs as full as possible and, the latter to keep the partly empty, for the same period. Thus, this paper presents three methodological proposals: i) Disregard the waiting volumes allocated for critical paths recession, ii) Use the forecast flows to calculate the critical path and iii) Change the waiting volumes at the