



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

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO IX

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP

ANTECIPAÇÃO DO REENCHIMENTO DOS VOLUMES DE ESPERA PARA MINIMIZAÇÃO DOS RISCOS DE DÉFICIT DE ATENDIMENTO À DEMANDA E/OU DE GERAÇÃO TÉRMICA

Igor Pinheiro Raupp^{*(1)} Fernanda da S. Costa^{(1),(2)} Jorge M. Damázio^{(1),(2)} Daniela de S. Kyrillos⁽¹⁾

⁽¹⁾ **CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica**
⁽²⁾ **UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

RESUMO

Este artigo apresenta uma metodologia de antecipação do reenchimento dos volumes de espera dos reservatórios do Sistema Interligado Hidrotérmico Brasileiro utilizados para controle de cheias e geração de energia elétrica, visto que a utilização dos reservatórios para estes dois usos é conflitante, uma vez que o primeiro tenta manter os reservatórios o mais cheio possível e o segundo parcialmente vazio, no mesmo período. A metodologia em questão utiliza informações hidrológicas do passado recente e altera o cálculo dos volumes de espera, diminuindo a alocação de volume de espera, e conseqüente minimização do risco de déficit de atendimento à demanda e/ou de geração térmica.

PALAVRAS-CHAVE

Controle de Cheias, Operação de reservatórios, Planejamento da Operação

1.0 - INTRODUÇÃO

Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidroelétricas e com múltiplos proprietários (1).

Devido à grande magnitude do sistema, com reservatórios de grande porte distribuídos por extensas regiões geográficas, qualquer decisão implica em diferentes conseqüências temporais e espaciais, tornando o problema bastante complexo. Existe, então, uma relação entre a tomada de decisão em um estágio qualquer e sua conseqüência 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 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 (2).

Adicionado a isso, a crescente utilização dos recursos hídricos para outros fins, que não a geração de energia elétrica, de acordo com a Lei nº 9.433/97, que determina que a gestão dos recursos hídricos deve proporcionar o uso múltiplo das águas com igual direito de acesso ao uso dos recursos hídricos por todos os setores usuários, impôs diversas restrições sobre a operação das usinas hidroelétricas e seus reservatórios.

Um dos usos conflitantes com a geração de energia elétrica nos reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN) é o controle de cheias, uma vez que, a operação dos reservatórios para a geração de energia elétrica

procura manter os reservatórios cheios, armazenando água na época de cheia, para utilizá-la em períodos hidrológicos menos favoráveis, e o controle de cheias precisa manter parte dos volumes dos reservatórios vazios (volume de espera), para proteger o vale a jusante da usina hidroelétrica de vazões extremas que possam ocorrer na bacia, no mesmo período.

Com o intuito de minimizar tais conflitos, tornou-se necessário o contínuo aprimoramento da metodologia de cálculo dos volumes de espera, desenvolvida pelo CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica), buscando otimizar a alocação dos volumes de espera. Dentre eles, pode-se citar: a alocação sazonal de volumes de espera ao longo da estação chuvosa (3), a abordagem estocástica introduzida através da utilização de cenários sintéticos de vazões diárias (9), a consideração dos reservatórios a montante de um ponto de controle (local onde há restrição de vazão máxima) para a sua proteção (4), e a consideração de informações macro-climáticas (El Niño - Oscilação Sul) para a geração dos cenários sintéticos (5).

Mesmo assim, 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 neste período. Esta é uma preocupação recorrente, pois o volume de água não disponível nos reservatórios ao final da estação chuvosa poderá prejudicar o atendimento à demanda de energia elétrica.

Neste sentido, COSTA et al (6) apresentou uma metodologia, detalhada em RAUPP (7), de antecipação do reenchimento dos volumes de espera nos reservatórios do SIN, através da alteração dos volumes de espera nos meses finais do período chuvoso de acordo com a informação hidrológica dos meses iniciais, que apresentou resultados muito satisfatórios.

Como prosseguimento na tentativa de se obter uma alocação de volume de espera mais otimizada, neste presente artigo é apresentada uma proposta metodológica de alteração do cálculo dos volumes de espera combinada com a utilização de informações hidrológicas dos meses que antecedem o final do período chuvoso (7). Para verificar sua eficiência e comparar com a metodologia apresentada em COSTA et al (6) e RAUPP (7), aplicou-se esta nova metodologia na bacia do Rio Paraná.

2.0 - METODOLOGIAS PARA CÁLCULO DE VOLUME DE ESPERA

2.1 Metodologia Atual (metodologia tradicional)

A atual metodologia de cálculo dos volumes de espera a serem alocados nos reservatórios do SIN se baseia na Teoria das Condições de Controlabilidade (8), que é uma extensão do método das Trajetórias Críticas (3) 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. Para calcular o volume de espera, este método emprega um algoritmo recursivo e admite volume de espera nulo no último dia da estação chuvosa, uma vez que a partir do fim da estação, não será mais necessário alocar volume de espera. O cálculo é feito através da seguinte equação:

$$VE(t-1,s) = \max\left[0, (Q_{AFL}(t-1,s) - Q_{RESTR}) \times \Delta t + VE(t,s)\right], \quad t = T, \dots, 1 \quad (1)$$

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

Onde:

$VE(t,s)$ - volume de espera para o t-ésimo dia do s-ésimo ano;

T - último dia da estação chuvosa;

$Q_{AFL}(t,s)$ - vazão média diária afluente do t-ésimo dia do s-ésimo ano;

Q_{RESTR} - vazão de restrição (vazão acima da qual ocorrem inundações no vale à jusante);

Δt - intervalo de discretização.

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. A trajetória crítica garante a proteção do vale a jusante do reservatório para um ano específico, ou seja, para a seqüência de afluições considerada. Porém, como os volumes de espera são definidos antes do início da estação chuvosa, não é possível saber qual será a seqüência de afluições diárias que irá ocorrer durante esta estação. Este problema, devido a aleatoriedade das vazões, é estocástico.

Uma forma de tratar este problema é considerar um conjunto de cenários de afluições diárias possíveis de ocorrer, para tal faz-se uso de um modelo estocástico de geração de cenários sintéticos de vazões diárias (modelo DIANA) (9). Para cada um dos cenários é então calculada a 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 2, fornecendo uma curva limite, que para qualquer dos cenários considerados, o ponto de controle associado ao reservatório estará protegido, isto é, respeitando os volumes da envoltória, será garantido a não ocorrência de violação da vazão de restrição caso ocorra qualquer um dos cenários deste conjunto.

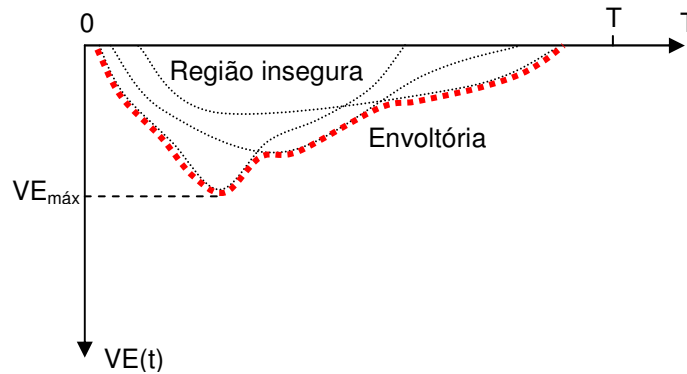


FIGURA 1: Envoltória de um reservatório para três trajetórias críticas.

A envoltória é definida matematicamente como:

$$ENV(t) = \text{máx}[VE(t, c); c = 1, \dots, n]; t = 1, \dots, T \quad (2)$$

Onde:

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

n – número de cenários considerados no cálculo da envoltória.

Se a proteção do vale for associada a um determinado risco, então 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):

$$\bar{N} = \frac{N_{SS}}{TR} \quad (3)$$

Onde:

\bar{N} – número de cenários que 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 serão protegidos, deve-se escolher um critério para o descarte dos cenários que não serão levados em consideração no cálculo da envoltória. Neste artigo utilizou-se o critério de máximo reenchimento, que descarta cenários que requerem vazões alfluentes maiores para garantir que o reservatório chegue ao final do período chuvoso cheio. A decisão do método de descarte de um determinado cenário é baseado na variável tangente máxima, de acordo com a equação:

$$TAN_{MÁX}(c) = \text{máx} \left[\frac{VE(t, c)}{\Delta t}; t = 1, \dots, T \right]; c = 1, \dots, N_{SS} \quad (4)$$

$$\text{Sendo: } \Delta t = (T + 1) - t \quad (5)$$

Onde:

$TAN_{MÁX}(c)$ – Tangente máxima do c-ésimo cenário.

Os cenários a serem descartados, serão aqueles que apresentarem os maiores valores para a tangente máxima.

2.2 Metodologia de Alteração do Cálculo das Trajetórias Críticas (metodologia 2)

Esta metodologia tem como objetivo calcular trajetórias críticas com uma menor alocação prévia de volume de espera e consiste na alteração no cálculo das trajetórias críticas de forma que os volumes de espera associados ao período de recessão da cheia de cada cenário sintético, sejam eliminados, em outras palavras, desconsidera-se os espaços vazios necessários para armazenar os volumes das cheias correspondentes ao período após o pico da cheia (recessão) (7). A figura 2 ilustra a hidrógrafa de uma cheia e ressalta o período correspondente à sua recessão.

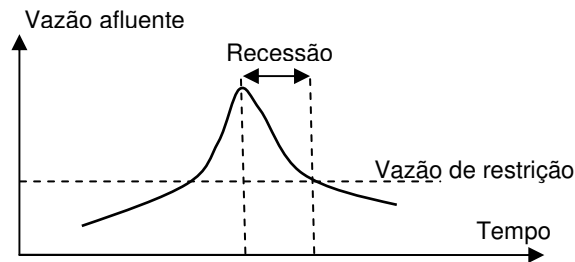


FIGURA 2: Hidrógrafa de uma cheia hipotética.

Esta proposta tem como princípio o próprio 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 associado ao volume vazio máximo (necessário para armazenar o pico da cheia), defluindo-se a vazão de restrição, obtém-se exatamente os volumes correspondentes à trajetória crítica, mesmo que estes volumes não 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 necessários para armazenar o volume até o pico da cheia, 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 afluências ocorra. A não alocação prévia destes volumes é uma forma mais eficiente de cálculo da trajetória crítica, pois diminui a necessidade de volume de espera na trajetória de cada cenário.

A diminuição da necessidade de volume de espera nas trajetórias críticas de todos os cenários poderá resultar numa diminuição na envoltória dos volumes de espera do final da estação chuvosa. Os três passos a seguir descrevem o procedimento para um dado cenário:

1- Cálculo da trajetória crítica ($VE(t)$, para $t = 0$ a T) de acordo com a equação 1;

2- Começando no instante $t = 0$ (início da estação chuvosa), verificar em que instante a vazão afluyente (Q_{AFL}) se iguala a vazão de restrição (Q_{REST}). De acordo com a equação (1), este instante (t^*) corresponde ao volume de espera máximo ($VE_{máx}$);

3- Definindo-se t_{FIM} o instante final da cheia, ou seja, o último dia em que a aflluência é maior que a vazão de restrição, fazer $VE(t) = 0 \quad t^* + 1 \geq t \geq t_{FIM}$.

O procedimento descrito acima, aplicado à cheia hipotética da figura 3, produz a curva de volumes de espera apresentada na parte inferior desta figura. Comparando-se as curvas de volumes de espera das figuras 3a e 3b, pode-se observar a diferença nas trajetórias resultantes.

Deve-se atentar para o caso em que duas ou mais cheias sucessivas resultem em uma mesma curva de volume vazio, sem que o volume de espera se anule entre as cheias. Neste caso, 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, ou seja, quando a vazão afluyente 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 afluências, seguindo o procedimento proposto, as envoltórias são obtidas conforme a metodologia tradicional (atual), de acordo com a equação 2, do item 2.1.

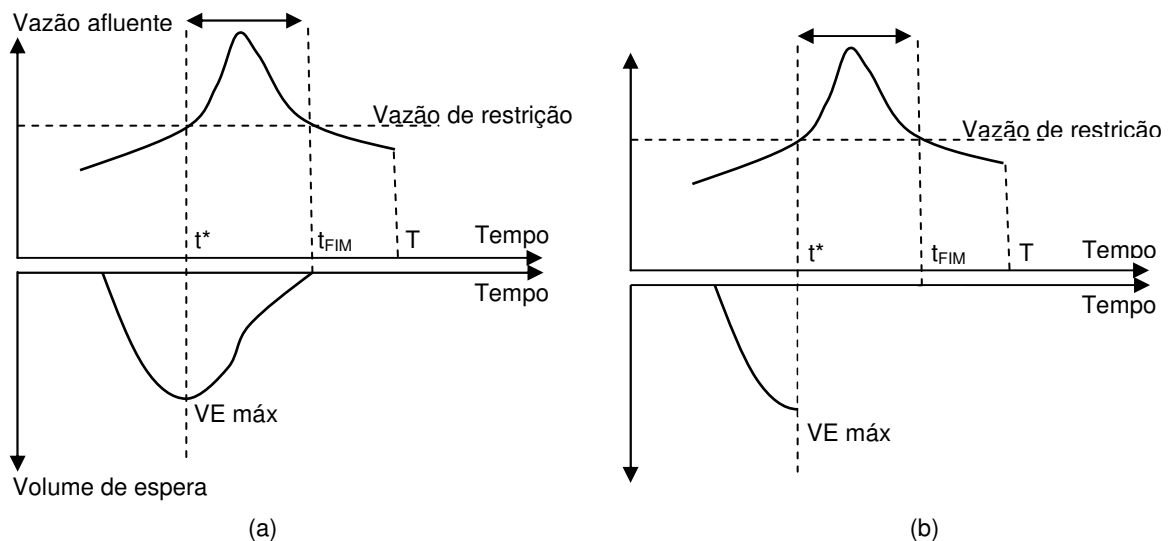


FIGURA 3: (a) Hidrógrafa de um cenário hipotético e a necessidade de volume de espera (trajetória crítica) correlata e (b) Trajetória crítica do cenário hipotético quando se aplica a metodologia 2.

2.3 Combinação das Metodologias de Utilização das Informações Hidrológicas do Passado Recente e Alteração do Cálculo das Trajetórias Críticas (metodologia 3)

A metodologia de utilização das informações hidrológicas do passado recente, apresentada em COSTA et al (6) e detalhada em RAUPP (7), que chamaremos neste artigo de metodologia 1, consiste em identificar a informação hidrológica dos meses iniciais do período chuvoso que permita antever o comportamento das cheias nos meses finais e alterar o cálculo das envoltórias dos meses finais condicionando os valores dos volumes de espera a esta informação.

Desta maneira, os valores de volumes de espera para o período inicial da estação chuvosa correspondem aos valores da envoltória calculados conforme a metodologia tradicional (atual), de acordo com a equação 2. Para o período final da estação, esta envoltória é substituída por três outras (para o caso de classificação em três classes), cada uma correspondente a uma classe. Para calcular a envoltória associada a cada classe no final da estação chuvosa, deve-se verificar quantos cenários de cada classe não foram protegidos neste período pela envoltória obtida pela metodologia tradicional e, então, para cada classe, calcular a envoltória do seu conjunto de trajetórias críticas descontando-se aquelas que não foram protegidas pela envoltória obtida pela metodologia tradicional (sem classificação) e que pertenciam a classe correspondente.

Para consideração da metodologia apresentada neste artigo (metodologia 2) combinada com a de utilização das informações hidrológicas do passado recente (metodologia 1), que chamaremos neste artigo de metodologia 3, deve-se calcular trajetórias críticas dos cenários sintéticos de acordo com a metodologia 2, apresentada no item 2.2 deste artigo, e calcular as envoltórias de acordo com a metodologia 1, apresentada em COSTA et al (6) e detalhada em RAUPP (7). A seguir são apresentados os passos para a aplicação da metodologia 3, isto é, consideração conjunta das duas metodologias:

- 1- Geração de "n" conjuntos de cenários sintéticos de aflúências (proporcionais ao histórico), cada um condicionado a uma classe (admitindo "n" como o número de classes);
- 2- Cálculo das trajetórias críticas dos cenários, com alteração no cálculo de acordo com a metodologia descrita nesta artigo (metodologia 2);
- 3- Seleção dos cenários que serão protegidos, de acordo com o tempo de retorno adotado;
- 4- Cálculo da envoltória, desconsiderando os cenários que não serão protegidos;
- 5- Determinação dos cenários que não são protegidos no final do período chuvoso e a que classe pertencem;
- 6- Cálculo da envoltória para cada classe, para o final do período chuvoso, não considerando os respectivos cenários que não serão protegidos.

Desta forma, denominaremos:

- Metodologia tradicional: metodologia em uso atualmente;
- Metodologia 1: Metodologia que utiliza informações hidrológicas do passado recente, apresentada em COSTA et al (6) e detalhada em RAUPP (7);

- Metodologia 2: Metodologia que altera o cálculo das trajetórias críticas, detalhada em RAUPP (7) e apresentada neste artigo;
- Metodologia 3: Metodologia que combina as metodologias 1 e 2, proposta em RAUPP (7) e neste artigo.

3.0 - APLICAÇÃO

A bacia na qual a metodologia 3, proposta neste artigo, foi aplicada é a Bacia do Rio Paraná, uma vez que em COSTA et al (6) e em RAUPP (7) a metodologia 1 foi aplicada para esta bacia, desta maneira, será possível comparar a alocação de volume de espera, considerando ou não a metodologia proposta neste artigo e verificar a eficácia da consideração da combinação das metodologias 1 e 2.

Assim como em COSTA et al (6) e RAUPP (7), por simplificação, considerou-se o sistema de reservatórios da bacia do rio Paraná até o aproveitamento hidroelétrico de Jupuíá como um único reservatório, e a afluência como a vazão natural total até este aproveitamento. Como restrição de controle de cheias considerou-se o limite máximo de defluência a jusante de Jupuíá de 16000 m³/s. Foram utilizados 12000 cenários sintéticos de afluências diárias gerados a partir da série histórica de vazões afluentes a UHE Jupuíá, através do modelo estocástico multivariado DIANA (9), pertencente ao sistema SPEC (10). O tempo de retorno considerado foi de 30 anos (valor utilizado nos estudos de prevenção de cheias realizados pelo ONS), resultando na não proteção de 400 cenários sintéticos do conjunto de 12000 cenários. Para o cálculo das envoltórias, foram seguidos os passos apresentados no item 2.3 deste artigo.

De acordo com COSTA et al (6) e RAUPP (7), a bacia do rio Paraná apresentou melhor resultado considerando:

- Divisão do período chuvoso em Novembro a Fevereiro como período inicial e Março e Abril como os meses iniciais;
- Três classes para os meses finais do período chuvoso (classes Alta, Média e Baixa);
- A vazão média mensal de Fevereiro como informação hidrológica do passado recente, para decidir qual envoltória, associada a uma classe, será considerada nos meses finais do período chuvoso.

Na tabela 1 é apresentado, para comparação, o número de cenários não protegidos em Mar-Abr para cada classe, considerando a metodologia 1 e a metodologia 3 para o cálculo das trajetórias críticas. Pode-se verificar uma diminuição do número de cenários não-protegidos em Março-Abril, uma vez que, esta nova maneira de cálculo das trajetórias críticas obtém trajetórias com menor alocação de volume de espera, principalmente na parte final destas.

Tabela 1 – Número de cenários não-protegidos de Março a Abril por classe.

Classificação	Nº de cenários	Nº de cenários não protegidos de março-abril	
		Metodologia 1	Metodologia 3
Independente	12000	230	109
Baixa	N _B = 1527	0	0
Média	N _M = 6763	4	2
Alta	N _A = 3710	226	107

Pela figura 4, onde são apresentadas as envoltórias de todo o período e das três classes para o período Mar-Abr, é possível observar que da mesma maneira que em COSTA et al (6) e RAUPP (7), as classes se mostraram bem distintas quanto à alocação de volume de espera. Para a classe Alta, existe uma antecipação de enchimento em 6 dias, para a classe Média de 13 dias e para a classe Baixa de 24 dias, em relação a envoltória obtida pela metodologia 1, apresentada em COSTA et al (6) e RAUPP (7). A classe Média, no início do mês de Março, aloca um volume de espera muito próximo da envoltória tradicional (quando não se considera classificação), mas depois diminui a alocação, antecipando o enchimento. A classe Alta aloca mais volume de espera, como era de se esperar, mas o enchimento acontece no mesmo período.

Nas figuras 5a e 5b são apresentadas as comparações das três classes utilizando a metodologia 1 e a metodologia 3. Observa-se que para as classes Baixa e Média, as envoltórias para a metodologia 3 alocam um menor volume de espera e permitem a antecipação do enchimento em uma semana. A nova classe Alta alocou mais volume de espera, o que pode ser explicado pelo menor número de cenários desta classe que foram descartados para o período de Março-Abril na construção da envoltória, como visto na tabela 1. Porém, mesmo alocando um maior volume, a classe Alta antecipa o enchimento duas semanas antes da envoltória da classe Alta original.

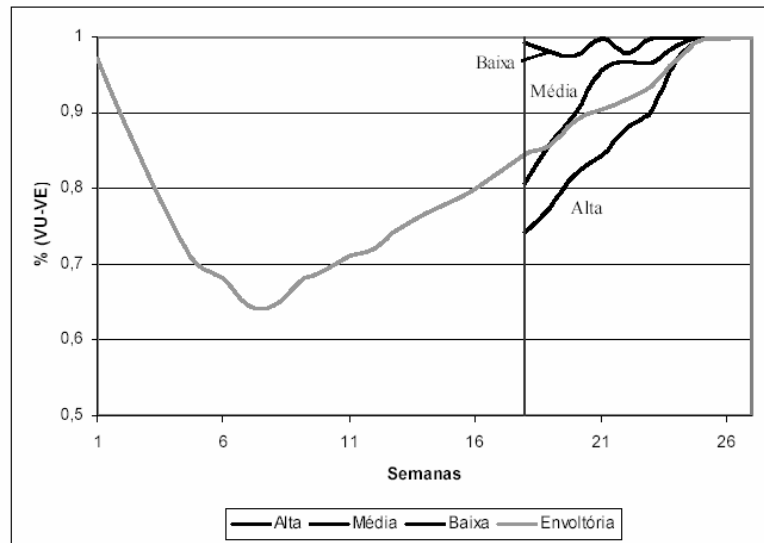


FIGURA 4: Envoltória segundo a metodologia 3.

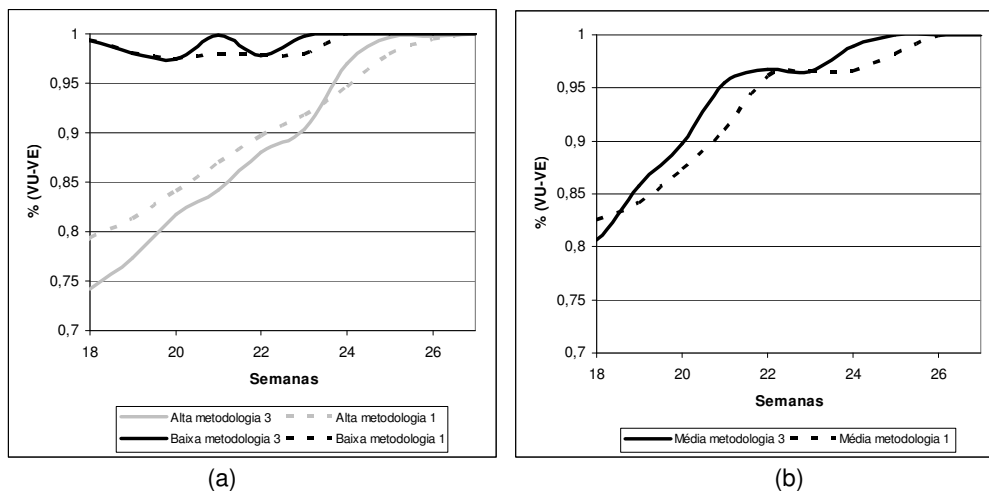


FIGURA 5: Comparação entre as envoltórias das classes baixa e alta (a) e média (b) das metodologias 1 e 3.

4.0 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÃO

Apesar das metodologias hoje adotadas pelo setor elétrico brasileiro para definição dos volumes de espera e para o planejamento da operação em situação de cheia buscarem minimizar o conflito entre este uso e a geração hidroelétrica, o aumento da demanda de energia elétrica, as restrições socioambientais que têm limitado a construção dos grandes reservatórios e o bom uso dos recursos hídricos, motivam a procura de aprimoramentos metodológicos que permitam diminuir a necessidade de volumes de espera, em especial nos meses finais da estação chuvosa, preservando-se o risco desejado.

Frente a isso, este artigo propôs alterar o cálculo das trajetórias críticas e da envoltória de volume de espera (metodologia 3) a fim de aumentar a garantia dos reservatórios atingirem o final da estação chuvosa cheios. São elas: (i) desconsideração dos volumes alocados para a recessão das cheias nas trajetórias críticas (metodologia 2) em conjunto com a (ii) alteração da envoltória de volume de espera na parte final da estação chuvosa de acordo com a vazão média mensal dos meses anteriores a data da tomada de decisão (metodologia 1), conforme metodologia descrita em COSTA et al (6) e detalhada em RAUPP (7).

Com o intuito de verificar a aplicabilidade e a eficácia da metodologia proposta, estas foram aplicadas na bacia do rio Paraná, considerando a proteção do ponto de controle de cheias a jusante da usina hidroelétrica (UHE) de Jupirá, cuja vazão máxima que não causa danos é 16000 m³/s (vazão de restrição). Algumas simplificações foram adotadas: (i) os demais pontos de controle de cheias da bacia não foram considerados (ressalta-se que a restrição a jusante da UHE Jupirá é a mais rigorosa da bacia) e (ii) os reservatórios da bacia a montante da UHE Jupirá foram considerados como um único reservatório equivalente cujo volume útil é a soma dos volumes úteis destes

reservatórios. Desta forma a série histórica de aflúências considerada foi aflúência total a UHE Jupia. O tempo de retorno utilizado no cálculo das envoltórias de alocação de volumes de espera foi de 30 anos, conforme os atuais Estudos de Prevenção de Cheias para esta bacia.

Para o cálculo das envoltórias, foram seguidos as etapas apresentadas no item 2.3 deste artigo. Como esperado, o resultado obtido neste artigo foi melhor que o obtido em COSTA et al (6), ou seja, consideração apenas da informação hidrológica do passado recente para tentar diminuir a alocação de volume de espera, ocorrendo antecipação de enchimento do reservatório para todas as classes e menor alocação de volume de espera para as classes Baixa e Média. Ou seja, além de alocar volume de acordo com as informações hidrológicas do início da estação chuvosa, se utilizou trajetórias críticas mais otimizadas, desconsiderando a recessão das cheias.

É interessante observar que, a princípio, acreditava-se que a desconsideração da recessão das cheias obteriam uma diminuição mais acentuada na parte final da envoltória, uma vez que foram desconsiderados os finais da alocação de volume de espera das trajetórias críticas. Porém, a aplicação apresentou uma diminuição de alocação de volume de espera durante toda a estação chuvosa. Isto pode ser explicado pelo fato das metodologias (tradicional e revista) terem escolhidos cenários diferentes para não serem protegidos, e pelo fato dos picos das cheias (conseqüentemente máximo das trajetórias críticas) ocorrerem ao longo de toda a estação chuvosa e não apenas no final.

A partir dos resultados apresentados neste artigo, pode-se concluir que a metodologia proposta (metodologia 3) se apresenta como um possível aprimoramento a ser utilizado na metodologia atual de cálculo da curva de volume de espera, procurando, assim, aumentar a garantia de reservatórios cheios ao final da estação chuvosa. Mas, para tanto, recomenda-se: (i) adaptar estas metodologias em bacias com múltiplos reservatórios e múltiplos pontos de controle, ou seja, adaptar a metodologia para ser utilizada no cálculo das trajetórias crítica através das condições de controlabilidade, a fim de verificar sua eficácia, uma vez que os resultados apresentados neste artigo foram obtidos com a simplificação da bacia considerando um único reservatório e um único ponto de controle; e (ii) aplicar as metodologias em outras bacias com hidrologias diferentes, para verificar seu efeito nos volumes de espera (por exemplo, identificar outras datas para tomada de decisão, outras divisões da estação chuvosa, maiores ganhos com o cálculo das trajetórias crítica desconsiderando a parte das recessões das cheias).

5.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) ANEEL, 2005, Atlas de Energia Elétrica no Brasil – 2ª edição, Brasília, Brasil.
- (2) SILVA, E.L., FINARDI, E.C., 1999, Curso de Planejamento de Sistemas Hidrotérmicos, Projeto CEPEL, ASMAE, UFSC, Novembro.
- (3) KELMAN, J., 1987, “Cheias e Aproveitamentos Hidroelétricos”, Revista Brasileira de Engenharia, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) COSTA, F.S., RAUPP, I.P., DAMÁZIO, J.M., 2007, “Antecipação do Reenchimento dos Volumes de Espera nos Reservatórios do Sistema Interligado Nacional – SIN”, XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Outubro.
- (7) RAUPP, I. P., 2008, Minimização do Conflito entre a Geração de Energia Elétrica e o Controle de Cheias no Planejamento da Operação de Reservatórios, Tese de M.Sc., COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., NEVES, F.P., et al, 1999, “Sistema SPEC – Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias em Sistemas Hidroelétricos”, XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, MG, Brasil, Novembro.