

CONTROLE DE CHEIAS EM SISTEMAS HIDROELÉTRICOS ONDE EXISTEM RESERVATÓRIOS SEM CONTROLE DE DEFLUÊNCIAS

Fernanda da Serra Costa^{1}; Igor P. Raupp²; Luiz Guilhon³, Paulo Diniz de Oliveira⁴ & Jorge M. Damázio⁵*

Resumo – Um dos usos dos reservatórios das usinas hidroelétricas do Sistema Interligado Nacional (SIN) é o controle de cheias. Parte da capacidade dos reservatórios do SIN é reservada para o controle de cheias através dos Volumes de Espera, que são calculados na primeira etapa dos Estudos de Prevenção de Cheias, realizados anualmente pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). A metodologia atualmente em uso, na maioria das bacias, pressupõe que todos os reservatórios utilizados para controle de cheias possam controlar suas defluências. Entretanto, em algumas bacias existem usinas hidroelétricas cujos vertedores não possuem dispositivo de controle de defluências. Este artigo apresenta uma proposta de adaptação da metodologia atualmente em uso, para permitir sua aplicação em bacias onde existem reservatórios sem controle de defluências.

Palavras-Chave – Controle de Cheias, Usinas Hidroelétricas.

FLOOD CONTROL IN HYDROELECTRIC SYSTEMS WHERE THERE ARE RESERVOIRS WITHOUT OUTFLOW CONTROL

Abstract – One of the uses of the reservoirs of hydropower plants in the National Interconnected System (SIN) is flood control. Part of reservoir capacity of SIN is reserved for flood control through Waiting Volumes, which are calculated in the first stage of the Flood Prevention Study, conducted annually by the National System Operator (ONS). The methodology currently applied in most basins assumes that all reservoirs used for flood control can control their outflows. However, in some basins there are hydro plants whose spillways have no control device. This paper presents an adaptation of the methodology currently in use to allow its application in this situation.

Keywords – Flood Control, Hydropower Plants.

¹ CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica/Universidade do Estado do Rio de Janeiro-UERJ, fernanda@cepel.br.

² CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica, raupp@cepel.br.

³ ONS-Operador Nacional do Sistema Elétrico, guilhon@ons.org.br.

⁴ ONS-Operador Nacional do Sistema Elétrico, diniz@ons.org.br.

⁵ CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica/Universidade do Estado do Rio de Janeiro-UERJ, damazio@cepel.br

INTRODUÇÃO

Na legislação brasileira a gestão dos recursos hídricos deve proporcionar o uso múltiplo das águas com igual direito de acesso a este recurso por todos os setores usuários. Além da geração de energia elétrica, um dos usos dos reservatórios das usinas hidroelétricas do Sistema Interligado Nacional (SIN) é o controle de cheias. Este uso é conflitante com a geração de energia elétrica, uma vez que, na operação visando a geração de energia elétrica procura-se manter os reservatórios cheios, armazenando água na época de hidrologia favorável, para utilizá-la em períodos hidrológicos menos favoráveis, e para o controle de cheias procura-se 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.

Para minimizar este conflito, o controle de cheias é considerado no Planejamento da Operação do SIN, realizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro (ONS), através do Estudo Anual de Prevenção de Cheias (ONS, 2012). Este Estudo pode ser dividido em duas etapas. A primeira etapa é o cálculo dos volumes de espera a serem alocados nos reservatórios do SIN. Estes volumes são definidos, anualmente, antes do início da estação chuvosa, uma vez que seus resultados devem estar disponíveis no início desta estação, para que os volumes de espera possam ser alocados nos reservatórios. A segunda etapa, denominada operação de controle de cheias, é realizada durante a estação chuvosa e visa a programação da operação de controle de cheias nos reservatórios, através da decisão de enchimento/esvaziamento dos volumes de espera. Atualmente as ferramentas utilizadas na primeira etapa para a maioria das bacias do SIN é o sistema SPEC (COSTA *et al*, 1999) e para a operação de controle de cheias são os programas ARISCO (GTHO, 1996), OPCHEN (COSTA *et al*, 2011, RAUPP *et al*, 2012) e OPCHEND (COSTA *et al*, 2003 e 2004).

O objetivo deste artigo é apresentar uma proposta para adaptação da metodologia atualmente em uso, na maioria das bacias do SIN, para cálculo dos volumes de espera em bacias onde existam reservatórios sem controle de defluências ou com controle limitado.

CONTROLE DE CHEIAS NO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

Na primeira etapa dos estudos de prevenção de cheias, quando se calcula os volumes de espera, a metodologia em uso nas principais bacias do SIN, implementada no sistema SPEC, é baseada na teoria de controlabilidade (DAMÁZIO *et al*, 1994). Como os valores dos volumes de espera a serem alocados nos reservatórios devem estar disponíveis no início da estação chuvosa, seu cálculo é realizado com alguns meses de antecedência, portanto, as afluições que ocorrerão durante a estação são desconhecidas. Para representar a estocasticidade das afluições são consideradas séries sintéticas de vazões diárias geradas pelo modelo DIANA (KELMAN *et al*, 1983) de forma multivariada. Após a geração das séries, o sistema de controle de cheias é decomposto em conjuntos de reservatórios (denominado sistemas parciais – s.p.) localizados à montante de um ponto de controle de cheias (local onde existe limitação de vazão máxima, de modo a não causar danos as benfeitorias e a população a jusante). Para cada uma das séries sintéticas de vazões diárias são calculadas as curvas de alocação temporal de volumes espera dos sistemas parciais necessárias para a proteção da bacia (trajetórias críticas - TC). Neste cálculo, considera-se que um reservatório poderá auxiliar na proteção todos os pontos de controle a jusante, e não apenas o imediatamente a

jusante. A este tipo de sistema de controle de cheias, denominado sistema com múltiplos pontos de controle de cheias e múltiplos reservatórios, diz-se que é feito o controle de cheia integrado da bacia. Estes volumes são calculados associados a um nível de proteção contra cheias (“risco de cheias”) representado pelas probabilidades de rompimento das restrições de defluências máximas do sistema, em termos de tempo de recorrência (TR). Calculadas as TCs de todas as séries sintéticas de cada s.p., calcula-se a Envoltória dos s.p., definida como a curva temporal do limite máximo dos volumes de espera associadas ao TR definido. No sistema SPEC, o cálculo das TCs e das envoltórias por s.p. é realizado pelo programa CAEV. Por último, para poder alocar os volumes de espera nos reservatórios, as Envoltórias dos s.p. são desagregadas espacialmente nos reservatórios que compõem os s.p. através da solução de um problema linear estocástico com função objetivo refletindo interesses da geração de energia elétrica, através do programa VESPOT do sistema SPEC.

RESERVATÓRIOS SEM CONTROLE DE DEFLUÊNCIAS

A metodologia descrita resumidamente no item anterior pressupõe que os reservatórios das usinas hidroelétricas utilizados para controle de cheias sejam capazes de controlar suas defluências, ou seja, que seus vertedores sejam dotados de dispositivos de controle. Em algumas bacias do SIN, onde existe a necessidade de utilizar seus reservatórios para o controle de cheias, além da geração de energia elétrica, existem reservatórios que não dispõem de dispositivos para controle dos seus vertimentos. Um exemplo é a bacia do rio Paraíba do Sul, onde o reservatório da usina hidroelétrica Jaguari tem um vertedor em lâmina livre e o reservatório da usina hidroelétrica Paraibuna que tem vertedor Tulipa. Estes reservatórios para o sistema de controle de cheias e geração de energia elétrica são os mais a montante da bacia. Atualmente, nesta bacia não se adota o sistema SPEC nos Estudos de Prevenção de Cheias, utiliza-se o método da Curva Volume-Duração (ONS, 2012) para calcular os volumes de espera, de forma independente, apenas nos reservatórios das usinas hidroelétricas Santa Branca e Funil, localizadas mais a jusante na bacia. Neste cálculo, utilizam-se as vazões regularizadas das usinas de Paraibuna e Jaguari, obtidas através da simulação das séries históricas de afluentes a estas usinas. O cálculo dos volumes de espera é feito através do programa MSP (ONS, 2003) desenvolvido especificamente para simular a operação da bacia do rio Paraíba do Sul. As rotinas MSP1 e MSP2 simulam a operação das usinas Paraibuna e Jaguari respectivamente, conforme apresentado na Figura 1.

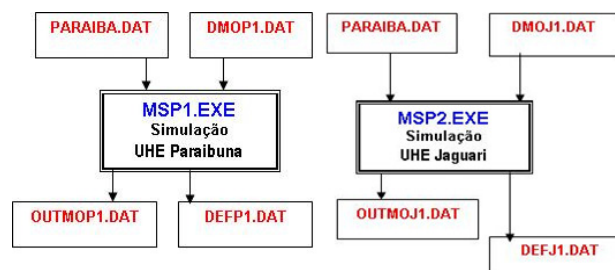


Figura 1 - Fluxograma do uso das rotinas MSP1 e MSP2 do simulador MSP.

A proposta apresentada neste artigo para aplicação do sistema SPEC nos Estudos de Prevenção de Cheias em bacia de rios com reservatórios sem controle de defluências ou com limitações no controle de defluências, consiste em uma adaptação do procedimento adotado para o cálculo de volumes de espera na bacia do rio Paraíba do Sul, e pressupõe que os reservatórios sem controle de defluências se localizem a montante do sistema de controle de cheias integrado. As

etapas da proposta para o cálculo da curva de volume de espera dos reservatórios do sistema de controle de cheias integrado da bacia são apresentadas no fluxograma da Figura 2 e listadas em seguida. Ainda na Figura 2, para facilitar a descrição do procedimento, incluiu-se como exemplo, a topologia de uma bacia fictícia formada por quatro reservatórios e dois pontos de controle de cheias, sendo que os dois reservatórios de montante (UHE1 e UHE2) não possuem controle de defluência e deseja-se calcular os volumes de espera a serem alocados nos reservatórios UHE3 e UHE4.

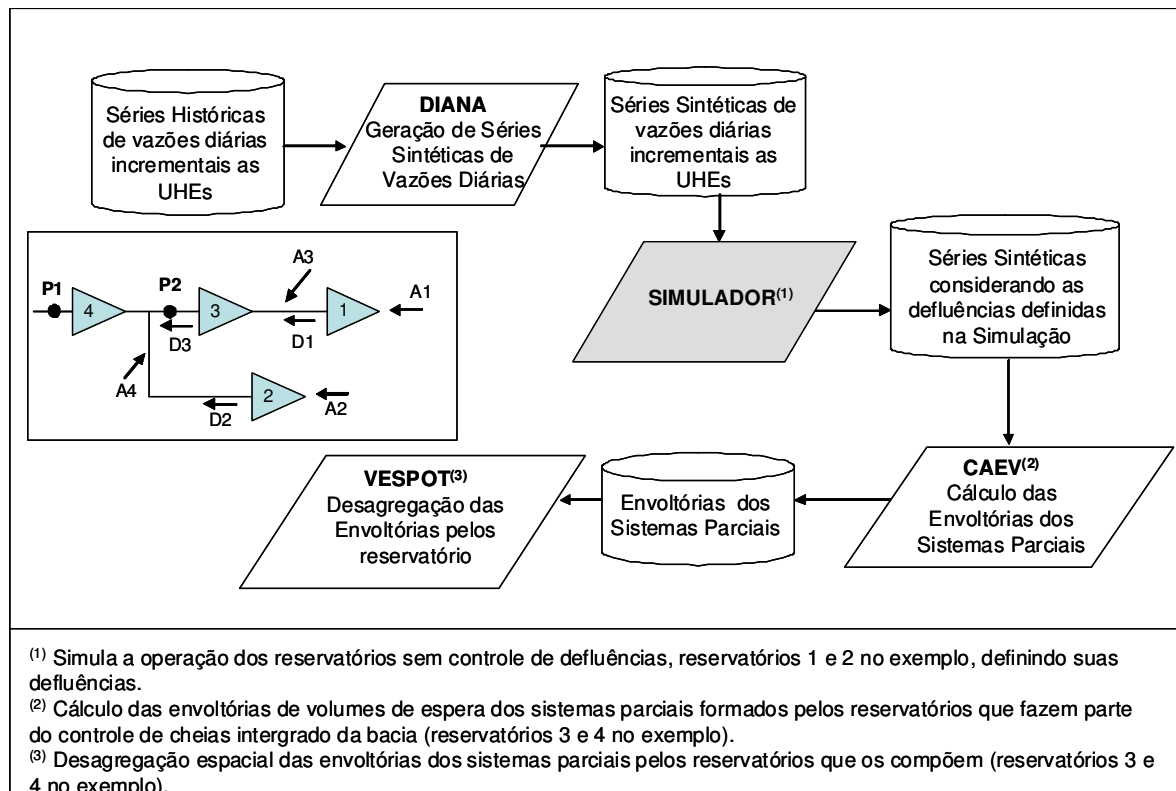


Figura 2- Fluxograma do procedimento para aplicação do sistema SPEC no cálculo de volumes de espera em bacias onde existem reservatórios com vertedores sem controle de defluências.

1. Geração de séries sintéticas de afluências diárias incrementais as quatro UHEs da bacia (A_i , $i=1, \dots, 4$).
2. Simulação da operação das usinas sem controle de defluência: simular a operação das UHEs 1 e 2, localizadas nas cabeceiras, cujos reservatórios não dispõem de controle de defluência, ou este controle é muito limitado. Consideram-se como afluências aquelas obtidas na geração das séries sintéticas (passo 1). O resultado das simulações são as defluências totais (turbinaadas + vertidas), D_i , $i=1, 2$.
3. Composição das afluências das usinas de jusante: para a UHE 3 localizada à jusantes da UHE 1 sem controle de defluências, a vazão afluyente é dada pela soma das vazão incremental (A_3) obtida na geração das séries sintéticas com a defluência da usina de montante (D_1), resultante da simulação da operação das séries sintéticas da usina 1. Para a UHE 4 a vazão afluyente é o resultado da soma da incremental A_4 , obtida na geração das séries sintéticas, com a defluência da UHE 2 (D_2), resultante do simulador e a defluência da UHE 3 (D_3).

4. Cálculo dos volumes de espera dos sistemas parciais: para os reservatórios das UHEs que possuem controle de defluências (3 e 4) seguem-se os procedimentos descritos no item anterior: (i) Decomposição do sistema de controle de cheias formado pelos reservatórios (3 e 4) em sistemas parciais, (ii) Definição do nível de proteção, (iii) Cálculo dos volumes de espera dos sistemas parciais e (iv) Cálculo da Envoltória dos volumes de espera dos sistemas parciais.
5. Desagregação das Envoltórias dos sistemas parciais em volumes de espera por reservatório.

Para a adaptação da metodologia foi necessário o desenvolvimento de um simulador para realizar a operação dos reservatórios sem controle de defluências, que teve com base o modelo MPS. Para a bacia exemplo, apresentada na Figura 2, a operação dos reservatórios 1 e 2 é feita de forma independente. A regra de operação para o reservatório a ser simulado i para cada dia t é apresentada no fluxograma da Figura 3 e detalhada em seguida.

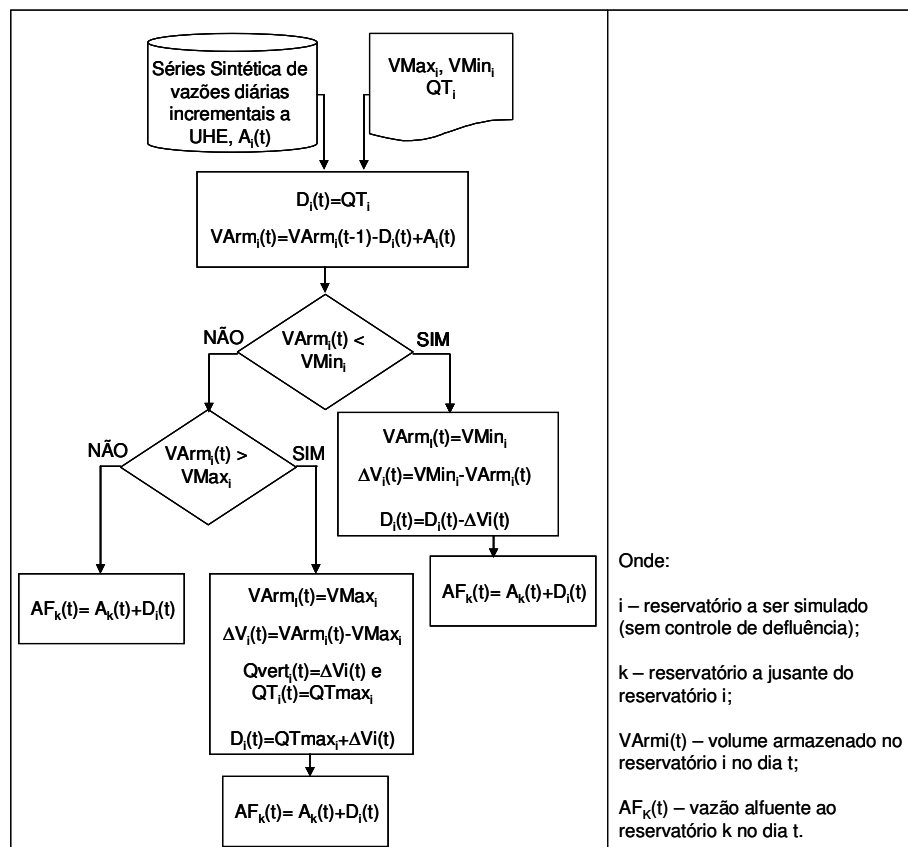


Figura 3 – Fluxograma simplificado da rotina de simulação da operação dos reservatórios sem controle de defluências.

1. Calcular o balanço hídrico do reservatório i considerando a afluência oriunda da série sintética e supondo como defluência ($D_i(t)$) uma vazão turbinada fornecida pelo usuário ($QT_i(t)$);
2. Caso o nível de armazenamento resultante do reservatório i seja inferior ao seu nível mínimo ($VMin_i$), calcular o volume necessário para que o reservatório atinja o seu nível mínimo ($\Delta V_i(t)$), atualizar a vazão turbinada descontando-se este volume, $QT_i(t) = QT_i(t) - \Delta V_i(t)$, e fazer a defluência ($D_i(t)$) igual ao novo valor de $QT_i(t)$;

3. Caso o nível de armazenamento seja superior ao nível máximo (V_{Maxi}), fazer a UHE turbinar sua vazão máxima turbinável (QT_{maxi}), e calcular a vazão a ser vertida necessária para que o reservatório atinja seu nível máximo. A vazão vertida ($Q_{verti}(t)$) é calculada através do método de Puls (HERNANDEZ, 2007). A defluência será $D_i(t) = Q_{verti}(t) + QT_{maxi}$.
4. As vazões afluentes aos reservatórios de jusante serão obtidas pela soma da defluência resultante da simulação da operação do reservatório imediatamente a montante com a afluência incremental. No exemplo da Figura 2, no dia t a afluência a UHE 3 seria obtida pela soma da defluência da UHE 1 ($D_1(t)$), com a afluência incremental a UHE 3 ($A_3(t)$), e a vazão afluente a UHE 4 seria obtida pela soma das defluências das UHEs 2 ($D_2(t)$) e 3 ($D_3(t)$), com a afluência incremental $A_4(t)$.

APLICAÇÃO

Para verificar a aplicabilidade da metodologia proposta, a mesma foi aplicada a bacia fictícia apresentada na Figura 2, que consiste numa simplificação da bacia do rio Paraíba do Sul. A bacia fictícia é formada por quatro reservatórios, sendo que os dois de montante (1 e 2) não possuem controle de defluência, e dois pontos de controle de cheias localizados a jusante dos reservatórios 3 e 4, que por sua vez possuem controle de defluência. Considerou-se como registro histórico de afluências diárias, uma adaptação das séries históricas de afluências as UHEs da bacia do rio Paraíba do Sul, no período de 1936 a 1995. Através do programa DIANA foram geradas 12.000 séries sintéticas de vazões diárias para as quatro UHEs da bacia fictícia. Na Tabela 1 são apresentadas as características das UHEs da bacia.

Tabela 1: Características da bacia fictícia.

UHE	Vol. Max. (hm^3)	Vol. Min. (hm^3)	Vaz. Turb. (m^3/s) ⁽¹⁾	Defl. Max. (m^3/s) ⁽²⁾
1	4732	2096	30 – 120	Não possui
2	1236	443	10 – 60	Não possui
3	438,5	131	40	300
4	888	282	80	700

(1) Limites máximo e mínimo para vazão turbinda.

(2) Restrição de defluência máxima que não causa inundações a jusante da UHE.

A vazão turbinada considerada na simulação da operação das UHEs 1 e 2 foram $30 m^3/s$ e $10 m^3/s$, respectivamente. As defluências definidas na simulação da operação das UHEs 1 e 2 foram adicionadas às vazões sintéticas incrementais afluentes as UHEs 3 e 4, resultando em uma nova série sintética de vazões afluentes a estas UHEs. O cálculo dos volumes de espera para proteção dos pontos de controle P1 e P2 considerou o sistema de controle de cheias integrado apresentado na Figura 4, composto por dois reservatórios e dois pontos de controle de cheias, que foi decomposto em três sistemas parciais: {4}, {3} e {4, 3}. O tempo de retorno (TR) adotado foi de 90 anos para P1 e 100 anos para P2. Foi então utilizado o programa CAEV para a obtenção das envoltórias dos volumes de espera para os três sistemas parciais e o VESPOT para obtenção das curvas de volume de espera por reservatório, apresentadas na Figura 4, onde se verifica que a necessidade de alocação de volume de espera para o reservatório 3 é pequena e se concentra no meio da estação chuvosa. O reservatório 4 necessita de volume de espera a partir da semana 6, com máximo de volume próximo a $230 hm^3$, o que representa menos de 40% de seu volume útil.

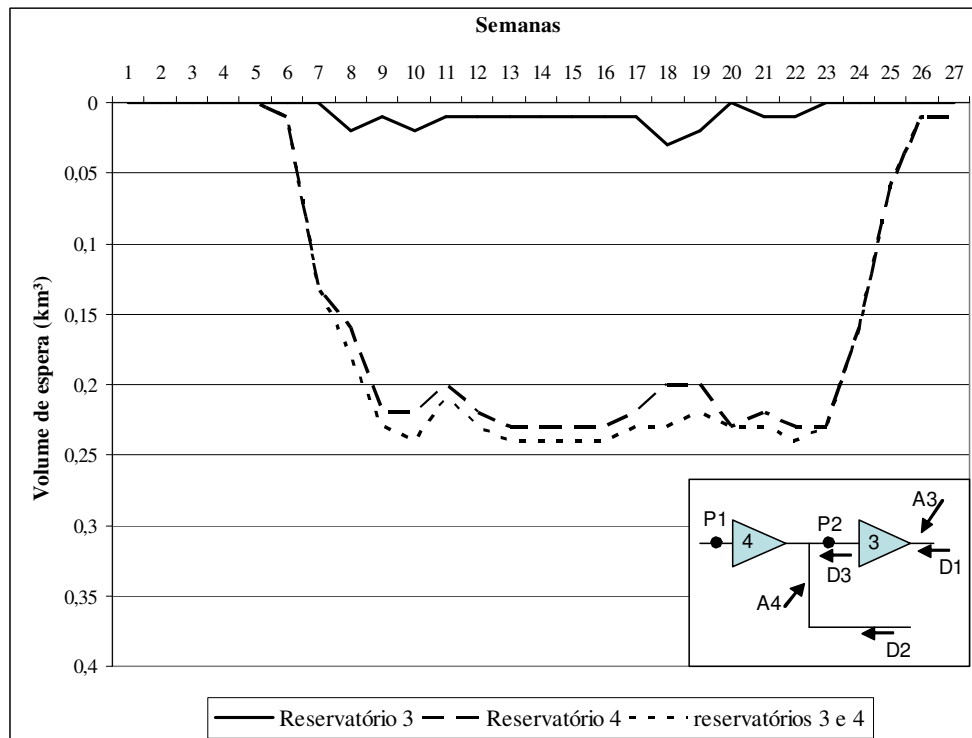


Figura 3 – Curvas de volume de espera dos reservatórios e total do sistema.

CONCLUSÕES

Mesmo em bacias onde os aproveitamentos de cabeceira não possuem estruturas de controle de defluências, a metodologia tradicional (SPEC) de cálculo dos volumes de espera para as demais usinas com estrutura de controle pode ser adaptada com a utilização de resultados oriundos de simulação das séries sintéticas nesses aproveitamentos mais a montante sem controle de defluências. O procedimento proposto neste artigo tem como vantagens em relação à adoção do método da Curva Volume-Duração, entre outras: (i) a possibilidade de considerar melhor as incertezas das afluições (através das séries sintéticas), (ii) o melhor aproveitamento dos volumes dos reservatórios para o controle de cheias, uma vez que permite considerar os efeitos sinérgicos entre os reservatórios da bacia, e (iii) a alocação sazonal dos volumes de espera ao longo da estação chuvosa. Além disto, a aplicação da metodologia SPEC permite um maior conforto na escolha do TR e conseqüentemente dos riscos associados, uma vez que tem como base resultados teóricos das condições de controlabilidade validados por simulações.

A proposta apresentada neste artigo, que amplia o uso do sistema SPEC, é mais um passo no aprimoramento das metodologias para os Estudos de Prevenção de Cheias em sistemas hidroelétricos. Entretanto, vale ressaltar que a qualidade das séries históricas de vazões afluentes aos aproveitamentos é fundamental para garantir resultados confiáveis e um planejamento seguro, e por isto deve-se buscar o seu contínuo aprimoramento.

REFERÊNCIAS

- COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., NEVES, F.P., GHIRARDI, A.O., ROCHA, V.F. (1999), Sistema SPEC – Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias em Sistemas Hidroelétricos. In *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte, MG, Brasil, Nov. 1999.
- COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., KYRILLOS, D.S., ROCHA, V.F., GHIRARDI, A.O., DANTAS, H.M.G. (2003), Programação da Operação de Sistemas Hidroelétricos em Situação de Controle de Cheias Usando Técnicas de Programação Linear – Modelo OPCHEND. In *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Curitiba, PR, Brasil, Nov. 2003.
- COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., KYRILLOS, D.S., ROCHA, V.F., GHIRARDI, A.O., DANTAS, H.M.G. (2004), Programação da Operação de Controle de Cheias Em Reservatórios de Sistemas Hidroelétricos - Modelo OPCHEND. In *Anais do XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica*, São Pedro, SP, Brasil, Out. 2004
- COSTA, F.S., RAUPP, I.P., DAMÁZIO, J.M., OLIVEIRA, P.D., GUILHON, L.G. (2011), Relaxamento de Restrições de Volumes de Espera na Operação de Controle de Cheias – Estudo de Caso Estação Chuvosa de 2006/2007 na Bacia do Rio Paraná. In *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Maceió, Nov. 2011.
- DAMÁZIO, J.M., MARIEN, I., COSTA, F.S. (1994), Building Flood Control Rule Curves for Multipurpose Multireservoir System Using Controllability Condition. *Water Resources Research*, vol.30, no. 4, pp.1135-1144.
- GTHO (1996). “Programa ARISCO - Avaliação do Risco na Operação de Controle de Cheias - Bacia do Rio Paraná”. *Relatório Técnico*, Rio de Janeiro, Brasil.
- HENANDEZ, V. (2007), Propagação de Enchentes em Reservatórios – Método Direto. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH*, vol. 12, n.2, p.p. 115-122.
- 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.
- ONS (2003). Sistema para Cálculo de Volumes de Espera para a Bacia do Rio Paraíba do Sul – SIP - Manual do Usuário/Instalação. Rio de Janeiro, Brasil.
- ONS (2012). Plano Anual de Prevenção de Cheias (Ciclo 2012-2013). *Relatório Técnico*, Rio de Janeiro, Brasil.
- RAUPP, I.P., COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M. (2012), Modelo OPCHEN – Ferramenta para Operação de Controle de Cheias em Sistemas Hidroelétricos. In *Anais do XXV Congresso Latino Americano de Hidráulica*, San José, Costa Rica, Set. 2012.