

## CADERNOS DO IME – Série Estatística

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ  
Rio de Janeiro - RJ - Brasil  
ISSN impresso 1413-9022 / ISSN on-line 2317-4536 - v. 36, p. 01 - 17, 2014

# MODELO DE SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA PARA OPERAÇÃO DE CONTROLE DE CHEIAS EM SISTEMAS HIDROELÉTRICOS

Fernanda da Serra Costa  
UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica  
[f.scosta@globo.com](mailto:f.scosta@globo.com)

Jorge Machado Damázio  
UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica  
[damazio@ime.uerj.br](mailto:damazio@ime.uerj.br)

Igor Pinheiro Raupp  
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica  
[raupp@cepel.br](mailto:raupp@cepel.br)

### Resumo

*O artigo apresenta um modelo de simulação estocástica para operação de controle de cheias em sistemas de reservatórios operados visando a geração de energia elétrica e o controle de cheias, OPCHENS. A utilização do modelo permite a avaliação do grau de proteção para controle de cheias fornecido pelos reservatórios e a análise estatística das regras de operação adotadas. Para tal, faz uso de 12.000 séries sintéticas de vazões diárias geradas através de modelagem estocástica. Para exemplificar é apresentada uma aplicação no sistema hidrelétrico da bacia do rio Paraná, localizada na região sudeste do Brasil.*

**Palavras-chave:** *Simulação Estocástica; Séries Sintéticas; Controle de Cheias; Hidroeletricidade.*

## 1. Introdução

De acordo com a legislação brasileira, expressa pela Lei 9.433 de 08/01/1997, em seu §1º item IV, 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. No Brasil um grande usuário dos recursos hídricos é o setor elétrico, uma vez que a matriz elétrica brasileira é predominantemente hidroelétrica (63,44% Hídrica) (ANEEL, 2014), tornando-se necessário a consideração dos usos múltiplos da água nos reservatórios das usinas hidroelétricas (UHE). Por outro lado, o crescimento econômico e populacional do país tem levado a um aumento no consumo de energia elétrica, assim como, a um aumento pela utilização dos seus recursos hídricos para outros fins, o que pode gerar situações de conflito pela utilização destes recursos. Um dos usos conflitantes com a geração de energia elétrica na operação dos reservatórios do Sistema Interligado Nacional<sup>1</sup> (SIN) é o controle de cheias, uma vez que estes dois usos procuram operar os reservatórios de maneira distintas. A operação dos reservatórios para a geração de energia elétrica procura mantê-los cheios, armazenando água na época de hidrologia favorável, para utilizá-la em períodos hidrológicos menos favoráveis, e o controle de cheias precisa manter parte dos volumes dos reservatórios vazios (Volume de Espera, VE), para proteger o vale a jusante da UHE de vazões extremas que possam ocorrer na bacia, no mesmo período.

Para atender a legislação brasileira e minimizar os conflitos, o Planejamento da Operação do SIN tem como um de seus objetivos a coordenação cuidadosa da operação do sistema hidráulico de seus reservatórios, de forma a evitar desperdícios, minimizando os riscos de geração térmica ou de déficits de suprimentos no SIN e proporcionando segurança quanto ao controle de cheias na bacia. Para tal, faz parte deste planejamento os Estudos de Prevenção de Cheias - EPC (ONS, 2013), que são realizados todos os anos antes do início da estação das chuvas (meses em que ocorrem os maiores totais precipitados, conseqüentemente as maiores vazões). Nestes estudos, realizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), são dimensionados os espaços que devem ser mantidos vazios nos reservatórios (VE), ao longo da estação chuvosa, de forma a armazenar os volumes das cheias que possam ocorrer. São também, definidas as regras

---

<sup>1</sup> As instalações de produção e transmissão de energia elétrica no Brasil estão na sua maioria interligadas formando o chamado Sistema Interligado Nacional, cuja operação é coordenada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Apenas 1,7% da energia requerida pelo país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica (ONS, 2014).

de operação dos reservatórios, que devem ser adotadas durante a ocorrência de cheias (quando a vazão afluente ao reservatório é acima da vazão em que ocorrem danos no vale a jusante). Os VEs variam temporalmente ao longo da estação chuvosa, de acordo com a frequência de ocorrência de cheias ao longo da estação, formando uma curva de evolução temporal destes volumes denominada Envoltória, que é calculada segundo metodologia descrita em (Costa *et al.*, 2014). Associa-se a cada Envoltória um grau de proteção, que consiste no risco de não conseguir amortecer as cheias nos VEs calculados. O risco adotado para cada bacia e utilizado nos EPC é fixado de forma conjunta pelo setor elétrico juntamente com a Agência Nacional de Águas - ANA (ONS, 2013).

Neste artigo apresenta-se um modelo de simulação estocástica para operação controle de cheias em reservatórios de sistemas hidroelétricos (CEPEL, 2008). O modelo tem como objetivo a avaliação dos VEs calculados nos EPC e das regras de operação propostas, através da análise estatística de variáveis associadas ao controle de cheias, tais como, o grau de proteção (risco) associado aos VEs, duração das inundações, vazões máximas defluentes dos reservatórios, número de inundações, etc. Para realizar a análise estatística o modelo simula a operação semanal de 12.000 cenários sintéticos de vazões afluentes aos reservatórios do sistema hidrelétrico num horizonte de tamanho igual a número de semanas da estação chuvosa da bacia em estudo. Estes cenários de afluições semanais são obtidos por um modelo estocástico de vazões diárias (Kelman *et al.*, 1983).

É apresentado um estudo de caso da bacia do Rio Paraná, situada na região sudeste do Brasil, uma das mais importantes bacia do país em se tratando de controle de cheias e geração de energia hidrelétrica. A partir dos resultados obtidos pelo modelo, avaliam-se os riscos associados aos diversos pontos de controle de cheias da bacia e a eficiência das regras de operação de controle de cheias.

## 2. O Modelo OPCHENS

No controle de cheias em uma bacia hidrográfica inicialmente devem ser identificados os locais onde a ocorrência de vazões superiores a determinados valores provoca inundações que podem levar a prejuízos e portanto, devem ser evitadas, sendo estes locais denominados pontos de controle de cheias (PC). Para cada PC deve-se definir o valor de vazão acima da qual ocorrem inundações, denominado limite de defluência máxima ou vazão de restrição ( $Q_{m\acute{a}x}$ ). Considera-se que uma bacia encontra-se em

situação de cheia quando a vazão afluente a algum de seus reservatórios é superior ao limite de defluência máximo, acima do qual ocorrerá inundação nos pontos de controle a jusante.

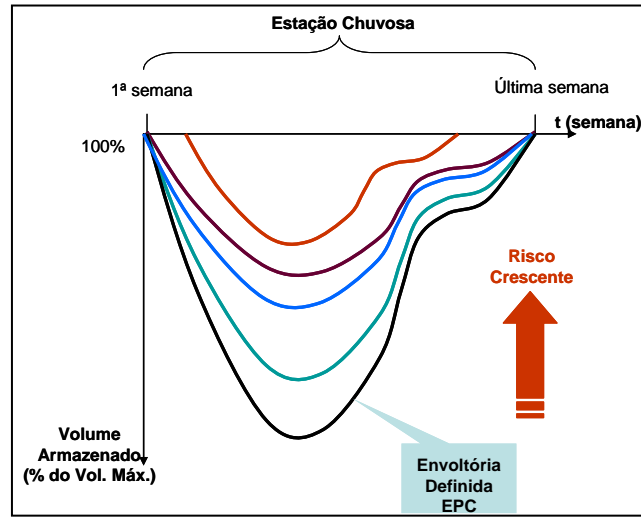
A regra básica para operação de reservatórios de UHEs para controle de cheias com discretização semanal consiste em: (i) se não estiver ocorrendo cheia, manter os VEs vazios; (ii) na ocorrência de cheia, defluir a vazão de restrição, permitindo a ocupação dos VEs; e (iii) após a ocorrência da cheia (quando a vazão afluente torna a ser inferior à vazão de restrição), operar de forma a retornar aos níveis dos VEs.

Durante a ocupação/esvaziamento dos VEs é desejável que seja possível acompanhar a evolução do risco de inundação na bacia, e, do ponto de vista de geração de energia elétrica, sempre que possível: (i) manter a operação de controle de cheias o mais próximo da operação puramente energética; e (ii) utilizar os VEs de forma balanceada na bacia, evitando-se assim o deplecionamento excessivo de alguns reservatórios.

O modelo OPCHENS tem por objetivo a simulação da operação semanal de controle de cheias, considerando os VEs e as regras de operação estabelecidos nos EPC, para um conjunto de cenários prováveis de vazões semanais com horizonte de tempo igual a duração da estação chuvosa da bacia em estudo. O resultado da operação de controle de cheias para cada semana é sintetizado através das vazões defluentes programadas e níveis de armazenamentos atingidos ao final de cada semana nos reservatórios das UHEs da bacia.

Para que seja possível, durante a ocupação/esvaziamento dos VEs, acompanhar a evolução do risco na bacia em estudo, consideram-se mais quatro conjuntos de Envoltórias, além do conjunto de envoltórias calculadas no EPC associado ao grau de proteção de controle de cheia a ser fornecido à bacia através da alocação de VEs. Os cinco conjuntos estão associados a riscos crescentes, de forma que, a medida que os volumes de espera (Envoltórias) vão sendo ocupados/esvaziados seja possível avaliar o risco associado ao espaços vazios disponíveis na bacia, conforme esquema da Figura 1.

Figura 1 – Esquema dos cinco conjuntos de curvas Envoltórias de Volumes de Espera.



## 2.1 Formulação Matemática do Modelo

O modelo OPCHENS representa matematicamente a operação de controle de cheias para cada semana  $t$  da estação chuvosa através de um problema de programação linear (PPL), no qual a função objetivo e as restrições refletem as regras de operação descritas no item 2 e características importantes da operação a serem preservadas. As equações (1) a (8) apresentam a formulação matemática do modelo.

$$\text{Função Objetivo} = \text{Min} \sum_{j=1}^{n_{\text{restr}}} \text{penalidade}_j(j, t) \times \text{folgas}_j(j, t) \quad (1)$$

Sujeito a:

a) Balanço hídrico de cada UHE

$$e_i(t) + \sum_{j=1}^n c_{i,j} r_j(t) - r_i(t) = e_i(t-1) - q_i(t-1) \quad i = 1, \dots, R \quad (2)$$

$$0 \leq e_i(t) \leq V_i \quad (3)$$

b) Defluências mínimas (em geral, defluência energética) para cada UHE

$$r_i(t) \geq m_i \quad (4)$$

c) Volume meta (volume alcançado com a operação energética) por UHE

$$e_i(t) - \lambda_i^f(t) \leq f_{\text{cima}_i}^f \quad \lambda_i^f(t) \geq 0 \quad i = 1, \dots, n \quad f = 1, \dots, nf \quad (5a)$$

$$e_i(t) + \theta_i^f(t) \geq f_{\text{baixa}_i}^f \quad \theta_i^f(t) \geq 0 \quad i = 1, \dots, n \quad f = 1, \dots, nf \quad (5b)$$

- d) Volumes de espera dos sistemas parciais<sup>2</sup> associados aos K conjuntos de envoltórias (cada qual associado a tempos de retorno diferentes) para cada sistema parcial u

$$-\sum_{i \in u} e_i(t) - \delta_u^k(t) \leq ENV_u^k(t) \quad , \quad \delta_u^k(t) \geq 0 \quad \forall u \in U' \quad k = 1, \dots, K \quad (6)$$

- e) Taxas de variação máxima de defluência semanal de cada UHE

$$|r_i(t) - r_i(t-1)| + \alpha_i \leq taxa_i \quad \alpha_i(t) \geq 0 \quad i = 1, \dots, R \quad (7)$$

- f) Defluências máximas dos aproveitamentos com ponto de controle de cheia a jusante (defluências acima das quais, danos poderão ser causados a jusante)

$$r_i(t) - p_i(t) \leq Qmax_i \quad p_i(t) \geq 0 \quad i = 1, \dots, R \quad (8)$$

Onde:

nrest: número de restrições do PPL;

t: índice da semana;

i: índice do reservatório;

R: nº de UHE na bacia em estudo que fazem parte da operação de controle de cheias;

U': conjunto de sistemas parciais formados pelas UHEs da bacia em estudo que fazem parte da operação de controle de cheias;

$r_i(t)$ : defluência da UHE i na semana t;

$q_i(t)$ : vazão afluente incremental a UHE i na semana t;

$e_i(t)$ : espaço vazio na UHE i na semana t;

$V_i$ : volume útil da UHE i;

$c_{j,i} = 1$  se a UHE j está imediatamente a montante da UHE i;

$c_{j,i} = 0$  se a UHE j não está imediatamente a montante da UHE i;

$m_i$ : vazão defluente mínima da UHE i (máximo entre a defluência energética e a ambiental);

$ENV_u^k(t)$ : espaço vazio associado a Envoltória do sistema parcial u do conjunto k na semana t;

$taxa_i$ : variação máxima entre a vazão defluente da UHE i nas semanas t e t-1;

---

<sup>2</sup> Define-se como sistema parcial o conjunto de reservatórios que tenham apenas um exutório e este seja um ponto de controle.

$Q_{max,i}$ : vazão defluente máxima da UHE  $i$  que não causa danos no ponto de controle de cheias a jusante, isto é, vazão de restrição;

$\delta_u^k(t)$ : folgas associadas às restrições de Envoltórias do sistema parcial  $u$  que descrevem a ocupação dos volumes de espera na semana  $t$ ;

$p_i(t)$ : folgas associadas a rompimentos das restrições de defluência máxima na UHE  $i$  na semana  $t$ ;

$\lambda_i^f(t)$  e  $\theta_i^f(t)$ : folgas associadas às restrições de faixas operativas abaixo e acima, respectivamente, do nível programado pelo planejamento energético sem controle de cheias para o final da semana  $t$  na UHE  $i$ ; e

$f_{cima}^f$  e  $f_{baixo}^f$ : limites inferiores e superiores, respectivamente, de armazenamento das faixas acima e abaixo do nível de armazenamento programado para o final da semana na UHE  $i$  pelo planejamento energético sem controle de cheias. Estas faixas são obtidas dividindo-se a diferença entre o volume máximo do reservatório e o volume referente ao nível programado por  $n_f$ . O modelo OPCHENS adota  $n_f = 5$ .

Durante a simulação de cada um cenário de vazões semanais, na solução do PPL de cada semana  $t$ , os valores de vazão e volumes vazios referentes ao instante  $t-1$ , considerados como condições iniciais, são aqueles obtidos na resolução do PPL referente a semana  $t-1$ , com excessão dos valores correspondentes ao instante de tempo  $t-1$  no PPL da primeira semana, neste caso, podem ser considerados valores sorteados aleatoriamente ou definidos previamente, como por exemplo, considerar que todos os reservatórios iniciam cheios. As condições iniciais para a primeira semana de cada um dos cenários de vazões deve ser a mesma.

A função objetivo do problema (equação 1), penaliza as folgas das restrições (b) a (f) (equações 4 a 8) de forma diferenciada. Os valores das penalidades estão relacionados com a ordem em que se aceita que as restrições sejam violadas, em caso de não ser possível atender a todas as restrições do PPL sem que todas ou algumas variáveis de folga assumam valores diferentes de zero.

A ordem de violação das restrições está associada ao tipo de operação de controle de cheias que se espera num sistema de reservatórios onde são considerados dois usos: controle de cheias e geração de energia elétrica. A regra de operação em situação normal de cheia conduz a seguinte ordem de violação das restrições: (i) defluência energética das UHEs, (ii) faixas de armazenamentos (volumes meta) das UHEs da bacia (viola-se primeiro, se possível, as faixas associadas ao esvaziamento do reservatório), (iii)

envoltórias dos sistemas parciais, (iv) taxa de variação de vazão defluente e (v) defluências máximas das UHEs.

Se na solução do problema todas as folgas  $\delta_u^k(t)$ 's e  $p_i(t)$ 's são nulas, prevê-se que o sistema, nesta semana, não estará em situação de cheia, diz-se, então, que o Estado da Operação de Controle de Cheias é nulo. Se na solução do problema pelo menos uma das folgas  $\delta_u^k(t)$  é maior que zero e todas as folgas  $p_i(t)$ 's são nulas, prevê-se que o sistema deverá operar na semana no modo de operação de cheias, sem, entretanto, ocorrência de defluências superiores ao limite máximo, ou seja, não causa danos a jusante. Neste caso a evolução do risco na bacia pode ser acompanhada observando-se qual dos K conjuntos de Envoltórias está tendo seu espaço vazio ocupado. Supondo que seja o conjunto k, então o risco da bacia encontra-se entre os riscos associados às Envoltórias dos conjuntos k e k+1. Se na solução do problema pelo menos uma das folgas  $p_i(t)$ 's é maior que zero, prevê-se que o sistema deverá operar na semana no modo de operação de cheias com emergências relacionadas com os PCs onde ocorreram  $p_i(t)$ 's maiores que zero.

## 2.2 Opções de simulação

O modelo pode ser utilizado para simulação de forma estocástica ou determinística. Na simulação estocástica utiliza-se um conjunto cenários sintéticos de vazões afluentes as UHEs da bacia em estudo, cada cenário representa uma sequência de afluições possível de ocorrer durante a estação chuvosa. Nos EPC estes cenários são gerados através de um modelo estocástico multivariado de vazões diárias DIANA (Kelman *et al.*, 1983). Considera-se um conjunto de 12.000 cenários e as vazões diárias destes cenários são agregadas por semana, resultando em cenários de vazões semanais. Com os resultados das simulações dos 12.000 cenários são calculadas estatísticas que permitem avaliar a proteção para controle de cheias que está sendo fornecida. Para cada ponto de controle de cheias (PC) são obtidas as seguintes estatísticas: (i) média, desvio padrão e distribuição acumulada da duração das inundações, (ii) média, desvio padrão e distribuição acumulada da magnitude das inundações, (iii) distribuição acumulada do volume armazenado final nos reservatórios (iv) número de inundações, número de inundações por estação chuvosa, (v) número de anos com inundação e (vi) risco. Desta forma, é possível, por exemplo, verificar se existem PCs que estão com proteção inferior



a planejada. É possível também fazer a simulação estocástica considerando-se o conjunto de cenários históricos de vazões afluentes que ocorreram nos anos passados.

Na simulação determinística considera-se apenas um cenário de afluições e utiliza-se, em geral, as afluições verificadas durante a estação chuvosa de um ano do passado. Neste caso não é possível realizar uma análise estatística dos resultados. Quando se opta por este tipo de simulação tem-se como objetivo analisar como seria o comportamento da bacia no caso da ocorrência daquele cenário específico de vazões. Como resultado da simulação da estação chuvosa selecionada, o modelo fornece para cada UHE, independente da mesma possuir a jusante um PC ou não as seguintes informações: vazão afluente incremental, vazão afluente regularizada, vazão defluente, parcela da defluência superior a restrição de defluência máxima, volume final e estado de operação de controle de cheias, para cada semana, durante toda a estação chuvosa.

### 3. Aplicação

Como exemplo de aplicação do modelo utilizou-se o sistema de UHEs da bacia hidrográfica do rio Paraná até o PC Porto São José (localizado no rio Paraná, a jusante da confluência com o rio Paranapanema), na região Sudeste. Esta bacia é uma das mais importantes do país no que se refere a complexidade do controle de cheias e da capacidade de geração de energia hidrelétrica. O sistema é formado por dezoito (18) UHEs, sendo catorze (14) com reservatório de regularização, nos quais é possível alocar VEs, quatro (4) usinas a fio d'água (o nível d'água do reservatório é fixo e portanto, não é possível alocar VEs) e onze (11) PCs, conforme apresentado no diagrama topológico da Figura 2. A Tabela 1 apresenta as características das UHE e dos PCs do sistema. A estação chuvosa nesta região abrange o período de novembro a abril e considerou-se que as UHEs começaram a estação chuvosa com os reservatórios cheios.

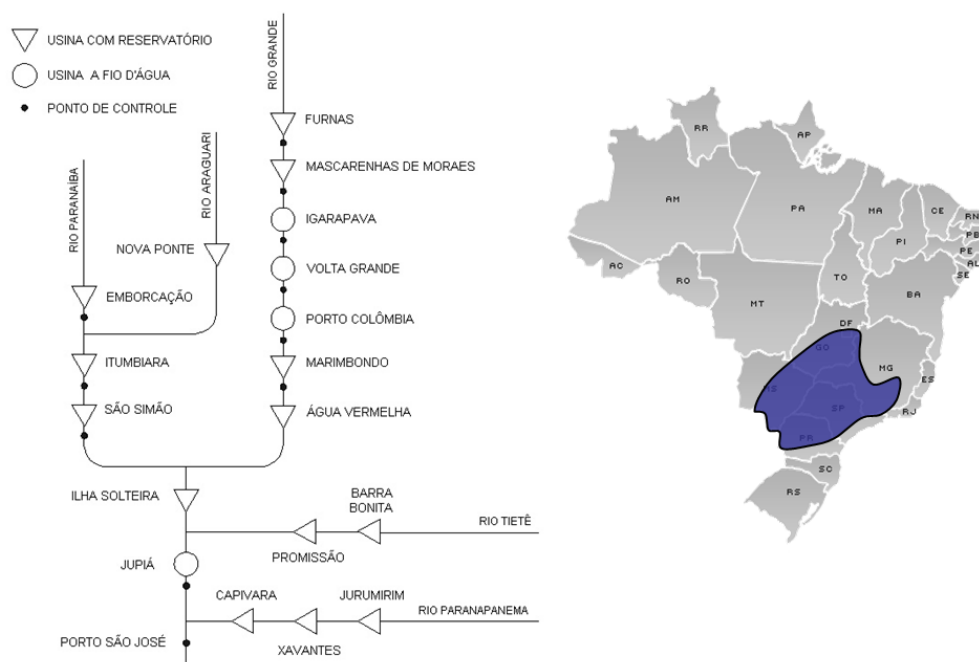
Foram gerados 12.000 cenários de afluições incrementais diárias utilizando o modelo estocástico DIANA para o cálculo das envoltórias, tendo como base o registro histórico de 56 anos de afluições diárias as 18 UHE e a Porto São José. Nesta aplicação, considerou-se assim como nos últimos EPC, o risco para esta bacia de 3,3%, ou seja, os reservatórios das UHEs deste sistema deverão garantir a proteção dos PCs considerando um risco de 3,3% (equivalente a um Tempo de Retorno - TR de 30 anos). Este foi o risco adotado para o cálculo do primeiro conjunto de envoltórias de acordo com a metodologia

descrita em (Costa *et al.*, 2014). Os outros quatro conjuntos de envoltórias foram calculados considerando riscos crescentes de 4%, 5,5%, 8,3% e 20%, que equivalem a TRs de 25 anos, 18 anos, 12 anos e 5 anos, respectivamente.

Como o intervalo de tempo do modelo de simulação estocástica, OPCHENS, é semanal, os cenários de afluições diárias foram transformados em cenários de afluições semanais, através da média das vazões dos sete dias da semana, e as curvas dos cinco conjuntos de envoltórias pelo valor máximo dos sete dias da semana.

Foi ainda gerado um segundo conjunto de 12.000 cenários de afluições diárias, que também foi transformado em afluições semanais, para utilização na execução do modelo OPCHENS, com o objetivo de obter resultados da simulação considerando cenários diferentes daqueles utilizados para a construção dos cinco conjuntos de envoltórias.

Figura 2 – Diagrama topológico do sistema de geração de energia elétrica e controle de cheias da bacia do rio Paraná até o PC Porto São José.



Fonte: Costa *et al.*, 2014.

Tabela 1 - Informações sobre as UHE e PCs do sistema da bacia do rio Paraná.

UHE / Ponto de Controle de Cheia	Restrição Vazão Máxima (m³/s)	Restrição Vazão Mínima (m³/s)	Volume Útil (km³)
Furnas	4000	1019.7	17.217
Mascarenhas de Moraes	4400	1013.7	2.500
Igarapava	4500	1091.3	0.000
Volta Grande	5000	1159.6	0.000
Porto Colômbia	7000	1361.4	0.000
Marimbondo	8000	1995.1	5.260
Água Vermelha	-	2061.3	5.169
Emborcação	5000	480.9	13.056
Nova Ponte	-	227.6	10.380
Itumbiara	7000	1580.5	12.454
São Simão	16000	1975.5	5.540
Barra Bonita	-	437.1	2.566
Promissão	-	712.1	2.128
Ilha Solteira	-	6590.5	8.965
Jupia	16000	6183.5	0.000
Jurumirim	-	199.2	3.165
Xavantes	-	304.4	3.041
Capivara	-	925.5	5.724
Porto S. José	24000	0.0	0.000

### 3.1 Resultados

A simulação dos 12000 cenários de afluições diárias diferentes daqueles que foram utilizados para o cálculo dos cinco conjuntos de envoltórias forneceu as seguintes estatísticas para cada ponto de controle de cheias:

- (i) em relação às inundações: número total de inundações, número de inundações por ano, média, desvio padrão, distribuição acumulada da duração das inundações e a sazonalidade (frequência de ocorrência de inundações por semana),
- (ii) em relação à defluência máxima das inundações: média, desvio padrão e distribuição acumulada.

Na tabela 2 são apresentadas as estatísticas referentes à duração das inundações e à defluência máxima durante a ocorrência de inundações para as UHEs que possuem PCs a jusante. Observa-se que a duração média encontra-se entre uma e duas semanas. Em Jupia este valor corresponde a 1,98 semanas. Com relação a média das defluências máximas, pode-se observar que em Jupia o percentual acima de sua restrição de defluência máxima atinge mais de 25%, enquanto que, nos demais PCs este percentual encontra-se entre aproximadamente 11 e 18%. Um maior detalhamento sobre as durações

das inundações e a magnitude das defluências máximas pode ser visto nas Tabelas 3a e 3b, onde são apresentadas as distribuições de frequência das durações das inundações e das defluências máximas para quatro PCs: a jusante das UHEs Furnas, Itumbiara e Jupia, e em Porto São José. Pode-se observar que as maiores frequências de inundação ocorrem a jusante da UHE Jupia, onde a defluência máxima chega a 10.000 m<sup>3</sup>/s a mais que o limite máximo de defluência (16.000 m<sup>3</sup>/s).

Retornando a Tabela 2, na coluna 8 são apresentados os TRs obtidos na simulação, observa-se que em nenhum PC estes valores foram inferiores a 30 anos (valor do planejamento), portanto a proteção desejada foi garantida. Para os PCs que apresentaram TRs próximos a 30 anos a maior proteção obtida pode ser explicada pelo fato de: (i) as envoltórias serem calculadas considerando intervalos de tempo diário, sendo posteriormente transformadas para intervalos semanais, considerando como o valor da envoltória na semana o máximo de sete dias; e (ii) na simulação do modelo OPCHENS as afluentes semanais serem calculadas pela média das vazões diárias dos sete dias da semana. Além disso, durante o cálculo das envoltórias no processo de escolha das séries que não serão protegidas, a ocorrência de séries que apresentam para o parâmetro de escolha valores muito próximos, leva na prática a que séries que não pertencem ao conjunto das séries selecionadas passem a ser também protegidas, resultando em maior proteção. No caso dos PCs que apresentaram TRs muito superior a 30 anos, por exemplo, São Simão, isto se deve ao fato do valor associado a sua restrição de vazão máxima (16.000 m<sup>3</sup>/s) ser muito raro (baixa frequência de ocorrência).

Tabela 2 – Estatísticas referentes a duração, vazão máxima das inundações e TRs obtidos na simulação.

Aproveitamento	Duração (semanas)		Defl. máx. durante inundações (m <sup>3</sup> /s)			Nº anos com rompimento	TR simulação (anos)
	Média	DP	Média	% <sup>(1)</sup>	DP		
Furnas	1,35	0,592	4556	13,9	468	339	35
Mascarenhas de Moraes	1,32	0,583	5122	16,4	558	257	47
Igarapava	1,43	0,686	5319	18,2	654	356	34
Volta Grande	1,38	0,629	5856	17,1	687	323	37
Porto Colômbia	1,12	0,404	7753	10,8	602	73	164
Marimondo	1,32	0,581	8925	11,6	762	100	120
Emborcação	1,00	-	5204	4,1	40	2	6000
Itumbiara	1,34	0,539	8296	18,5	1109	236	51
São Simão	-	-	-	-	-	0	infinito
Jupia	1,98	1,097	20271	26,7	2990	271	44
Porto S. José	1,39	0,604	26989	12,5	2154	79	152

<sup>(1)</sup> Percentual da média das defluências máximas acima da restrição de vazão máxima.

Tabela 3 (a) Distribuição de frequência das durações das inundações, e (b) Distribuição de frequência das defluências máximas a jusante das UHEs Jupia, Furnas, Itumbiara e no PC Porto São José.

Pr(D<d)	Duração das inundações (d) em semanas			
	Furnas	Itumbiara	Jupia	P.São José
0,95	3	2	4	3
0,9	2	2	3	2
0,5	1	1	2	1
0,1	1	1	1	1
0,05	1	1	1	1

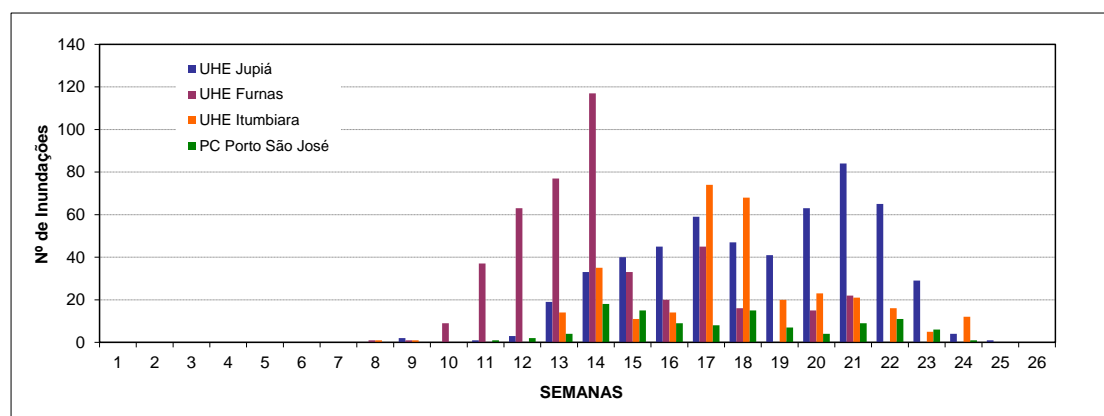
(a)

Pr(D<d)	Defluência máxima (m <sup>3</sup> /s)			
	Furnas	Itumbiara	Jupia	P.São José
0,95	5.556	10.620	26.052	31.577
0,9	5.248	9.949	24.552	30.257
0,5	4.379	7.979	19.596	26.681
0,1	4.092	7.201	16.849	24.488
0,05	4.070	7.149	16.582	24.344

(b)

Um resultado interessante, também obtido na simulação da operação com o modelo OPCHENS, é a frequência de ocorrência das inundações durante as semanas da estação chuvosa para cada PC da bacia. Este resultado permite analisar a sazonalidade da ocorrência de inundações. Na figura 3 são apresentadas as frequências de ocorrência das inundações para quatro PCs, selecionados de forma a caracterizar a sazonalidade da frequência de inundação nas diferentes regiões da bacia: jusante da UHE Furnas (rio Grande); jusante da UHE Itumbiara (rio Paranaíba), jusante da UHE Jupia (rio Paraná) e o PC Porto São José (ponto mais a jusante do sistema). Considerando que a semana 1 corresponde a primeira semana de novembro (início da estação chuvosa), pode-se observar, na Figura 3, que enquanto em Furnas a semana 14 (mês de janeiro) é a que apresenta a maior frequência de inundações, em Itumbiara a semana onde ocorre o maior número de inundações é a 17 (mês de fevereiro), já em Jupia a maior frequência ocorre na semana 21 (mês de março). O comportamento observado para Furnas mantém-se para os demais PCs localizados no rio Grande, assim como, o comportamento observado em Itumbiara se repete nos demais PCs localizados no rio Paranaíba. O comportamento diferente para a sazonalidade das inundações deve-se ao regime hidrológico das subacias.

Figura 3 – Frequência de inundações por semana na estação chuvosa para as UHEs Furnas, Itumbiara, Jupia e o PC Porto São José.



Os reservatórios utilizados para o controle de cheias na bacia do rio Paraná pertencem a UHEs, assim, além da preocupação em manter os VEs vazios durante a estação chuvosa, para na ocorrência de cheias estes espaços serem utilizados para seu amortecimento, minimizando os prejuízos com inundações, é importante que ao final da estação chuvosa os reservatórios tenham alcançado seus níveis máximos de armazenamento, de modo a enfrentar a estação seca que se inicia, quando os volumes de água armazenados serão utilizados para a geração de energia elétrica. Com o objetivo de avaliar a situação do armazenamento dos reservatórios ao final da estação chuvosa, a simulação com o modelo OPCHENS estima para cada reservatório as probabilidades dos volumes finais armazenados serem superiores a 70%, 85%, 90% e 99% de seus volumes úteis (volume útil é a capacidade de armazenamento do reservatório). Também são estimados os volumes finais mínimos dos reservatórios associados às probabilidades acumuladas de 0,05, 0,10, 0,15 e 0,20. Selecionou-se, como exemplo, as UHEs Furnas, Itumbiara, Emborcação e Nova Ponte por possuírem os reservatórios com maiores capacidade de regularização (volumes úteis).

Na Tabela 4a são apresentadas as probabilidades dos volumes finais armazenados dos reservatórios destas quatro UHEs serem superiores a 70%, 85%, 90% e 99% de seus volumes úteis. Pode-se observar que os reservatórios das UHEs Emborcação e Nova Ponte sempre atingiram o armazenamento máximo ao final da estação chuvosa, enquanto que, o reservatório da UHE Furnas (o maior deste sistema) apresentou probabilidade 0,997 de terminar completamente cheio. O reservatório da UHE Itumbiara apresentou a menor probabilidade de terminar cheio, 0,736, entretanto 100% das vezes terminou acima de 70% de armazenamento, o que mostra que a operação para controle de cheias, além da proteção contra as cheias durante a estação chuvosa, também atende a necessidade da geração de energia elétrica. Este comportamento também é observado na Tabela 4b, onde observa-se que para a UHE Itumbiara estima-se em 0,20 a probabilidade do volume final de seu reservatório ser menor que 64% do seu volume útil e 0,05 de ser menor que 54% de seu volume útil, ou seja, a probabilidade de seu armazenamento final ser maior de 50% do volume útil é maior que 0,95.

Tabela 4 – UHEs Furnas, Itumbiara, Emborcação e Nova Ponte: (a) Probabilidade do volume final ser maior ou igual a um percentual do volume útil, (b) Volume final mínimo associado as probabilidades de 0,05, 0,10, 0,15 e 0,20.

% VUTIL	Pr(Volume Final > %VUTIL)			
	Furnas	Itumbiara	Emborcação	Nova Ponte
99	0,997	0,736	1	1
90	1	0,978	1	1
85	1	0,994	1	1
70	1	1	1	1

(a)

Pr(VMIN < %VUTIL)	Volume Final Mínimo (%VUTIL)			
	Furnas	Itumbiara	Emborcação	Nova Ponte
0,05	95	54	99	100
0,10	95	58	100	100
0,15	95	61	100	100
0,20	95	64	100	100

(b)

#### 4. Conclusão

Neste artigo foi apresentado o modelo de simulação estocástica para operação semanal de controle de cheias em sistemas hidrelétricos, OPCHENS. O modelo simula a operação de controle de cheias através da solução de um problema de programação linear cujas restrições representam as regras de operação durante a ocorrência de cheias, um subconjunto destas restrições corresponde aos espaços vazios (Volumes de Espera) mínimos necessários para garantir a proteção dos pontos de controle da bacia associados a um risco pré-definido (TR) que são alocados em conjuntos de reservatórios (sistemas parciais). A função objetivo visa minimizar o somatório das variáveis de folga das restrições do problema multiplicado pelas penalidades a elas associadas. A simulação considera um conjunto de 12.000 cenários sintéticos de afluições semanais, gerados pelo modelo estocástico multivariado de vazões diárias, DIANA.

Como resultado da simulação são estimados os tempos de retorno alcançados, as estatísticas do número e duração das inundações e das defluências máximas, e as frequências de inundações ao longo da estação chuvosa, além das probabilidades associadas aos armazenamentos finais dos reservatórios.

Como caso exemplo, foi apresentada a simulação da operação do sistema de controle de cheias formado pelas UHEs da bacia do rio Paraná até o ponto de controle de cheias Porto São José, este sistema é formado por 14 reservatórios de regularização e 11 pontos de controle de cheias. A simulação com 12.000 cenários de afluições, diferentes daqueles utilizados para o cálculo dos volumes de espera, mostrou que além de evitar inundações os volumes de espera e as regras de controle de cheias adotadas apresentaram altas probabilidades de terminar a estação chuvosa com os reservatórios do sistema atingindo seu armazenamento máximo, de modo a enfrentar a estação seca que se inicia, quando os volumes de água armazenada serão utilizados para a geração de energia

elétrica, tornando os dois usos dos reservatórios (controle de cheias e geração de energia elétrica) menos conflitantes.

O modelo se mostra uma ferramenta útil para o planejamento da operação de controle de cheias em sistemas hidrelétricos.

## Referências

ANEEL. Banco de Informações de Geração (BIG). Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/operacao-capacidadebrasil.asp>>. Acesso em: 08/07/2014.

CEPEL, OPCHENS 2.2 - Simulação da Operação Semanal de Controle de Cheias em Situação Normal - Manual de Metodologia. **Relatório Técnico**, 2008.

COSTA, F.S., RAUPP, I. P., DAMÁZIO, J. M., OLIVEIRA, P. D. e GUILHON, G. F., The Methodologies for the Flood Control Planning using Hydropower Reservoirs in Brazil. In: **6º International Conference on Flood Management**, São Paulo, 2014.

COSTA, F.S., RAUPP, I. P., DAMÁZIO, J. M., Flood Control under the Brazilian Hydrothermal Power Generation System – A Daily Operation Model (OPCHEND). In: **HydroVision International 2014**, Nashville, 2014.

KELMAN, J., DAMÁZIO, J.M., COSTA, J.P., Geração de Séries Sintéticas de Vazões Diárias – Modelo Diana. **Revista Brasileira de Engenharia**, Vol.1, Nº 2, Pp. 5-22, 1983.

ONS, Plano Anual de Prevenção de Cheias (Ciclo 2013-2014). **Relatório Técnico**, 2013.

ONS, o que é o SIN – Sistema Interligado Nacional. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/o\\_que\\_e\\_sin.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx)>. Acesso em: 08/07/2014.



## STOCHASTIC SIMULATION MODEL FOR FLOOD CONTROL OPERATION IN HYDROPOWER SYSTEMS

### Abstract

*This paper presents a stochastic simulation model for flood control operation on hydropower reservoirs system that is used for power generation and flood control, OPCHENS. The use of the model allows the evaluation of the degree of protection provided by flood control reservoirs and statistical analysis of the operating rules adopted. The simulation uses synthetic scenarios of 12,000 daily streamflow generated by stochastic model. As an example the model is used to simulate the flood operation during the rainy season in the hydroelectric system in the Paraná River basin, located in the southeastern region of Brazil, where the reservoirs are used for flood control and power generation.*

**Key-words:** *Stochastic Simulation; Times Series; Flood Control, Hydropower System.*