



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

GOP - 16
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO IX
GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP**

**PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DE DEFLUÊNCIA DOS APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS DO SISTEMA
INTERLIGADO BRASILEIRO CONSIDERANDO O CONTROLE DE CHEIAS**

| | | |
|---|---------------------------------------|--|
| Fernanda da Serra Costa CEPEL/ UERJ | Jorge Machado Damázio* UERJ | Daniela de Souza Kyillos CEPEL |
| Helena M. G. Dantas ONS | Angela de O. Ghirardi ONS | Vinícius Forain Rocha ONS |

RESUMO

Uma das particularidades do planejamento da operação do sistema hidrotérmico interligado brasileiro é a necessidade do uso de parte da capacidade dos seus reservatórios como volumes de espera para a redução de danos causados por cheias de grande porte em áreas a jusante dos reservatórios.

Este artigo apresenta os recentes desenvolvimentos do modelo OPCHEND, cujo objetivo é programar para o próximo dia a ocupação ou esvaziamento dos volumes de espera do sistema, quando este se encontra em situação de cheia normal ou emergência, através da solução de um problema de programação linear e da utilização de Diagramas de Emergência.

PALAVRAS-CHAVE

Controle de Cheias, Volumes de Espera, Programação Eletro-energética, Diagrama de Emergência, Programação Linear.

1.0 - INTRODUÇÃO

Tendo em vista a complexidade do Sistema Interligado Nacional (SIN) o planejamento da operação é feito em três etapas, e em cada uma os modelos utilizados possuem diferentes horizontes de planejamento, discretização do tempo, e grau de detalhamento na representação das unidades geradoras. Estes modelos são encadeados através do acoplamento no final de seus horizontes das políticas de alocação dos recursos hídricos e térmicos produzida pelo modelo hierarquicamente superior, formando uma cadeia de modelos (1). No topo da cadeia está o planejamento de médio prazo onde o modelo de otimização estocástica, NEWAVE (1), obtém a política de alocação dos recursos hídricos e térmicos de mínimo custo para cada mês do horizonte (cinco a dez anos). O parque hidroelétrico é representado de forma agregada em quatro reservatórios equivalentes de energia representando os subsistemas do sul, sudeste, nordeste e norte. A seguir, no chamado planejamento de curto prazo, o modelo DECOMP (1) também de otimização estocástica, determina uma programação de geração em cada usina do sistema para as semanas do mês seguinte e para o segundo mês. Na base da cadeia, está a programação diária, em fase de implantação, onde o modelo DESSEM (1) de otimização determinística, calculará o despacho de geração para cada meia hora do dia seguinte.

Tendo em vista que a maioria dos grandes reservatórios brasileiro pertencerem ao SIN, uma das particularidades do planejamento da operação desse sistema é a necessidade do uso de parte da capacidade dos reservatórios dos aproveitamentos hidroelétricos como volumes de espera para a redução de danos causados por cheias de grande porte em áreas a jusante dos reservatórios. A definição e o planejamento do uso destes volumes de espera devem ser feitos de forma cuidadosa, para se evitar desperdícios, minimizando os riscos de geração térmica ou de déficits de suprimentos no SIN e, ao mesmo tempo, garantindo a proteção das áreas a jusante dos reservatórios.

*Av. Hum s/nº, Cidade Universitária – Ilha do Fundão - CEP 21944-970 – Rio de Janeiro - RJ - BRASIL
Tel.: (021) 2598-6086 - Fax: (021) 2598-6482 - e-mail:damazio@ime.uerj.br

A metodologia atualmente em uso nos estudos de prevenção de cheias do planejamento da operação do SIN, descrita em detalhes em (2), (3), (4) e (5), para definição dos volumes de espera considera a incerteza hidrológica através do uso de conjuntos de séries sintéticas de afluições diárias ao sistema e adota as condições de controlabilidade, onde o sistema de reservatórios analisado é decomposto em sistemas parciais, representando-se cada sistema parcial por um reservatório equivalente, para o qual calcula-se para cada tempo de retorno uma curva-guia superior para toda a estação chuvosa (envoltória). Os volumes correspondentes a esta envoltória são desagregados espacialmente, em curvas individualizadas para cada reservatório do sistema, através de um problema linear estocástico com função objetivo refletindo interesses da geração de energia elétrica.

A utilização dos volumes de espera durante a ocorrência de cheias deve seguir diretrizes e instruções específicas para a situação de operação normal de cheia (cheia que permanece, ao longo de sua duração, sem perspectiva de esgotamento dos volumes de espera dos reservatórios e de liberação de descargas defluentes que ultrapassem restrições à jusante dos aproveitamentos) e para situação de operação em emergência (cheia com perspectiva de esgotamento dos volumes de espera dos reservatórios, sendo necessário providenciar descargas defluentes totais que superem as restrições à jusante dos aproveitamentos, provocando danos). Na situação em emergência as regras de operação são definidas de forma a garantir a segurança da barragem, ficando em segundo plano a operação energética e a proteção das áreas à jusante, já na situação Normal as regras de operação têm como objetivo permitir a utilização dos volumes de espera da melhor forma possível sob o ponto de vista energético e de controle de cheias.

Na integração entre o planejamento da operação energética e a operação para controle de cheias os volumes de espera são representados nos modelos da operação energética como limites dinâmicos do armazenamento máximo de cada reservatório. No planejamento de médio prazo, devido ao horizonte e discretização temporal, não há a necessidade do detalhamento da ocupação/esvaziamento dos volumes de espera, enquanto que no médio prazo e na programação diária os limites de armazenamento referentes as envoltórias devem ser relaxados de forma a permitir a ocupação dos volumes de espera quando da ocorrência de cheias. No planejamento de curto prazo, o relaxamento dos limites de armazenamento é feito através do uso dos modelos ARISCO (6) e OPCHEN (7). Na programação diária, o relaxamento desses limites de armazenamento é feito através do uso do modelo OPCHEND (8), (9) e (10).

O modelo OPCHEND programa para o próximo dia a ocupação ou esvaziamento dos volumes de espera do sistema através da solução de um problema de programação linear (PPL). Tendo em vista o intervalo de tempo diário, e que, em alguns trechos do sistema, o tempo de translação dos transientes hidráulicos nos canais fluviais que interligam os aproveitamentos pode suplantar 24 horas, o OPCHEND considera na sua formulação mais que um intervalo de tempo e além de definir a ocupação/esvaziamento dos volumes de espera nas situações normais de cheias, também verificar a possibilidade de entrar-se em situação de emergência e nestes casos programar as defluências necessárias para a proteção do aproveitamento.

Este artigo apresenta os desenvolvimentos mais recentes do modelo OPCHEND. O caso-estudo é sistema da bacia do rio Paraná até o ponto de controle de cheia Porto São José onde estão localizados 40 aproveitamentos hidroelétricos e 19 pontos de controle de cheia. Num sistema como esse o número de sistemas parciais é 764. No caso de ocorrência de cheias simultaneamente em diversas sub-bacias (Paranaíba, Grande, Paranapanema,) o número de restrições ativas no PPL torna-se grande, podendo chegar a pouco mais de 20000, levando a um tempo de processamento incompatível com a necessidade da programação diária. É apresentada uma estratégia para redução do tempo de processamento de forma a torná-lo compatível com as necessidades da programação diária.

2.0 - MODELO OPCHEND

2.1 Operação em situação normal de cheia

No que se refere a operação para controle de cheias os aproveitamentos hidroelétricos de uma bacia hidrográfica podem ser classificados em três categorias considerando sua contribuição para o controle de cheias:

- Aproveitamentos que pertencem ao sistema de controle de cheias integrado da bacia. Neste categoria estão os aproveitamentos em que parte dos seus volumes úteis são alocados como volumes de espera para proteção integrada dos pontos de controle da bacia, ou os aproveitamentos a fio d'água que possuam ponto de controle imediatamente a jusante;
- Aproveitamentos que não pertencem ao sistema de controle de cheias integrado da bacia. Estes aproveitamentos não foram considerados na etapa de cálculo dos volumes de espera dos estudos de prevenção de cheias;
- Aproveitamentos com controle de cheias isolado e localizados nas cabeceiras do sistema de controle de cheias. Neste caso, o volume de espera alocado nestes reservatórios é utilizado apenas para a proteção de sua restrição, não contribuindo para o controle de cheias integrado da bacia.

Seja R o conjunto de aproveitamentos hidroelétricos de um sistema, tal que $R = R^{CCI} \cup R^{Cab} \cup R^{SCC}$, onde: R^{CCI} , conjunto de aproveitamentos do sistema de controle de cheias integrado; R^{Cab} , conjunto de aproveitamentos de cabeceiras com controle de cheias de sua própria restrição de jusante, e R^{SCC} , conjunto de aproveitamentos do sistema que não fazem parte do controle de cheias integrado e não pertencem a R^{Cab} .

Sejam $V_i, i=1, \dots, R$ as capacidades dos reservatórios de cada aproveitamento, e $M_i, i=1, \dots, R^{CCl} \cup R^{Cab}$, os limites de defluências em cada aproveitamento que não causam danos à jusante. Seja U o conjunto de sistemas parciais (5) e (7) do sistema formado por R^{CCl} . Seja γ o maior tempo de viagem da água entre aproveitamentos do sistema e, sejam R_τ , os conjuntos de aproveitamentos do sistema cujo tempo de viagem até o aproveitamento mais a jusante do sistema é menor ou igual a τ , para $\tau=1, \dots, \gamma$. Logo $R_\tau = R_\tau^{CCl} \cup R_\tau^{Cab} \cup R_\tau^{SCC}$.

Supondo-se disponível as seguintes informações:

- os volumes vazios verificados nos γ dias anteriores ao dia corrente, $e_i(t); t= d-1, d-2, \dots, d-\gamma$;
- os volumes vazios programados para o final do dia corrente, $e_i(d)$;
- as afluências incrementais previstas para o dia a ser programado ($d+1$) e para γ dias à frente, $q_i(t), t=d+1, \dots, d+\gamma$;
- defluências totais verificadas para os $(\gamma-1)$ dias anteriores ao dia corrente, $r_i(t), t=d-1, \dots, d-\gamma+1, \dots$;
- defluência total programada para o dia corrente (d), $m_i(d)$;
- defluências mínimas, representando a operação energética para o dia a ser programado ($d+1$) e γ dias à frente;
- as variações máximas de defluência, Δ_i ;
- os valores das envoltórias de cada sistema parcial $u \in U$ correspondentes ao final do dia a ser programado e alguns dias a frente para cada conjunto k de envoltória, $k=1, \dots, K$, $ENV_u^k(t), t=d+1, \dots, d+\gamma$. Para $k=1$, considera-se o tempo de retorno selecionado nos Estudos de Prevenção de Cheias. Os outros são tempos de retorno menores, correspondendo a situações de maior risco para ocorrência de rompimento das restrições.

Obtêm-se as defluências diárias de cada aproveitamento para o dia a ser programado, $r_i(d+1)$, através da solução de um problema de programação linear (PPL), cujas restrições são:

$$e_i(t) + \sum_{j=1}^n c_{ij} r_j(t - \tau_{ji}) - r_i(t) = e_i(t-1) - q_i(t-1) \quad i \in R_{t-d} \quad t = d+1, \dots, d+\gamma \quad (1)$$

$$0 \leq e_i(t) \leq V_i \quad i \in R_{t-d} \quad t = d+1, \dots, d+\gamma \quad (2)$$

$$-r_i(t) \leq -m_i(t) \quad i \in R_{t-d} \quad t = d+1, \dots, d+\gamma \quad (3)$$

$$-\sum_{j \in U} e_j(t - \tau_{ji}) - \delta_u^k(t) \leq -ENV_u^k(t) \quad , \quad \delta_u^k(t) \geq 0 \quad t = d+1, \dots, d+\gamma \quad \forall u \in U' \quad k = 1, \dots, K \quad (4)$$

i reservatório mais jusante do sistema

$$-e_i(t) - \delta_{(i)}(t) \leq -VE_{(i)}(t) \quad , \quad \delta_{(i)}(t) \geq 0 \quad i \in R_{t-d}^{Cab} \quad t = d+1, \dots, d+\gamma \quad (5)$$

$$r_i(t) - p_i(t) \leq M_i \quad p_i(t) \geq 0 \quad i \in R_{t-d}^{CCl} \cup R_{t-d}^{Cab} \quad t = d+1, \dots, d+\gamma \quad (6)$$

$$e_i(t) - \lambda_i^f(t) \leq \text{faixa}^f \quad \lambda_i^f(t) \geq 0 \quad i \in R_{t-d} \quad t = d+1, \dots, d+\gamma \quad f = 1, \dots, nf \quad (7)$$

$$e_i(t) - \theta_i^f(t) \geq \text{faixa}^f \quad \theta_i^f(t) \geq 0 \quad i \in R_{t-d} \quad t = d+1, \dots, d+\gamma \quad f = 1, \dots, nf \quad (8)$$

$$r_i(t) - r_i(t-1) + \nu_i(t) \leq \Delta_i \quad \nu_i(t) \geq 0 \quad i \in R_{t-d} \quad t = d+1, \dots, d+\gamma \quad (9)$$

$$r_i(t-1) - r_i(t) + \nu_i(t) \leq \Delta_i \quad \nu_i(t) \geq 0 \quad i \in R_{t-d} \quad t = d+1, \dots, d+\gamma \quad (10)$$

onde:

$c_{i,\ell} = 1$ se reservatório ℓ está imediatamente a montante de i ,

$c_{i,\ell} = 0$ se reservatório ℓ não está imediatamente a montante de i ,

$\tau_{\ell,i}$ é o tempo de viagem entre os reservatórios ℓ e i ,

$VE_{(i)}(t)$'s são os volumes de espera alocados nos reservatórios de cabeceiras;

$\delta_u^k(t)$'s, $\delta_{(i)}(t)$'s, $p_i(t)$'s, $\lambda_i^f(t)$'s, $\theta_i^f(t)$'s, $\nu_i(t)$'s e $\nu_i(t)$'s são folgas.

Se na solução do PPL todas as folgas $\delta_u^k(t)$'s, $\delta_{ij}(t)$ e $p_i(t)$'s são nulas, prevê-se que o sistema no horizonte em estudo não estará em situação de cheia. Se na solução do PPL pelo menos uma das folgas $\delta_u^k(t)$ e/ou $\delta_{ij}(t)$ é maior que zero e todas as folgas $p_i(t)$'s são nulas, prevê-se que o sistema deverá operar no dia t no modo de operação normal de cheias, sem ocorrência de violação das defluências máximas que causam danos à jusante. Se na solução do PPL pelo menos uma das folgas $p_i(t)$ é maior que zero, prevê-se que o sistema deverá operar no dia t no modo de operação de cheias com emergências relacionadas com os pontos de controle onde ocorreram $p_i(t)$'s maiores que zero, com violação das defluências máximas. A violação da defluência máxima, quando o diagrama de emergência não é consultado, só ocorre quando o volume se esgota. Com a inclusão da consulta ao diagrama de emergência (que será apresentada na próxima seção) a violação da defluência máxima poderá ser antecipada de forma a garantir a segurança da barragem.

A função objetivo do PPL consiste na minimização do somatório do produto entre as variáveis de folga das restrições do problema e as penalidades associadas. 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 formados pelos três tipos de aproveitamentos hidroelétricos descritos anteriormente. A idéia básica é que os volumes de espera dos aproveitamentos de cabeceiras, quando estes não fazem parte do controle de cheia integrado, só devem ser utilizados para o controle de suas taxas de variação de defluência e suas defluências máximas. Além disto, os níveis dos reservatórios definidos pela programação energética (refletida pela faixa de operação) dos aproveitamentos que não fazem parte do controle de cheia integrado da bacia e cabeceira com controle de cheia isolado, só devem ser alterados após a utilização dos volumes de espera dos aproveitamentos que fazem parte do controle de cheia integrado da bacia, caso contrário seus volumes deveriam ter sido considerados na etapa do cálculo dos volumes de espera nos estudos de prevenção de cheias. Desta forma a regra de operação em situação normal de cheia conduz a seguinte ordem de violação das restrições:

1. Defluência energética de todos os aproveitamentos da bacia,
2. Faixas de armazenamentos dos aproveitamentos que pertencem a R^{CCI} ,
3. Envoltórias dos sistemas parciais associadas aos aproveitamentos pertencem a R^{CCI} ,
4. Faixas de armazenamento dos aproveitamentos que pertencem a R^{SCI} e a R^{Cab} ,
5. Taxa de variação de vazão de todos os aproveitamentos da bacia, exceto os que pertencem a R^{Cab} ,
6. Defluência máximas dos aproveitamentos que pertencem a R^{CCI} ,
7. Envoltórias dos aproveitamentos pertencem a R^{Cab} ,
8. Taxa de variação de vazão dos aproveitamentos que pertencem a R^{Cab} ,
9. Defluência máximas dos aproveitamentos que pertencem a R^{Cab} .

Além desta priorização, as restrições de defluência máxima e de nível programado têm ainda uma priorização temporal, isto é, caso seja necessário violar estas restrições e haja a opção de violá-las no dia a ser programado ou nos dias subsequentes, deve-se primeiro violá-las nos dias subsequentes.

2.2 Operação em situação de emergência

As regras de operação em situação de emergência estão consolidadas nos Diagramas de Emergência (DE), que fornecem, a partir da afluência ao aproveitamento e o seu nível de armazenamento, a defluência superior a restrição, necessária para garantir a segurança da barragem, quando há a perspectiva de esgotamento do seu volume de espera. Existem também DE para reservatórios equivalentes, formados pelo conjunto de aproveitamentos a montante de um ponto de controle de cheias, neste caso considera-se a afluência a todos os aproveitamentos formadores do reservatório equivalente e a soma de seus volumes vazios para a definição da defluência no reservatório mais à jusante.

Estando o armazenamento do reservatório (isolado ou equivalente) em qualquer situação, pode ocorrer uma cheia em que a última vazão observada seja de tal magnitude que implicará necessariamente em uma vazão defluente maior que a vazão de restrição (11). A afluência pode ser tão alta que mesmo cessando naquele momento a chuva, o volume contido sob o hidrograma de recessão das vazões afluentes até a vazão de restrição implicará, caso mantida a defluência igual à vazão de restrição, em um volume a ser armazenado no reservatório maior que o volume vazio nele disponível.

Sejam: t o instante atual; q_A a vazão afluente observada no instante atual; M a vazão de restrição; VA a volume afluente a ser armazenado supondo-se a vazão defluente igual a vazão de restrição e Vd o volume vazio disponível no reservatório; então se $VA > Vd$ configura-se a Operação em Emergência (OE). Neste caso, é necessário operar com uma vazão defluente maior que a vazão de restrição, de forma a garantir que o volume excedente da cheia (diferença entre o volume afluente e o volume defluente) seja igual ao volume vazio disponível no reservatório. Ao ser caracterizada a OE, o problema passa a ser a definição da vazão defluente total a ser adotada a cada instante, de forma a assegurar que o volume a ser armazenado não seja maior que o volume vazio disponível. O DE define esta defluência para diversos valores de armazenamento no reservatório (ou nível d'água, no caso de reservatórios isolados) e de vazão afluente. A metodologia para determinação do DE encontra-se descrita em (11).

O DE tem como dados de entrada básicos a vazão afluente ao reservatório e o volume armazenado no reservatório (no caso de reservatórios isolados, pode-se adotar o nível do reservatório). O resultado é a vazão total a ser defluída. A hipótese fundamental assumida na construção do diagrama é a da recessão da vazão afluente à partir do último valor medido. Conhecida a vazão do curso d'água em um instante qualquer e havendo estiagem, as afluições subsequentes podem ser previstas pela seguinte expressão matemática:

$$q_t = q_0 e^{-a\Delta t} \quad (11)$$

onde: q_t é a vazão em um instante t qualquer da recessão; q_0 é a vazão em um instante t_0 anterior a t , também da recessão; a é a constante característica da bacia hidrográfica e $\Delta t = t - t_0$.

Uma das formas de determinação da constante característica da bacia hidrográfica, definida em (11), considera que a recessão das vazões de um curso d'água apresenta duas fases distintas; uma primeira fase mais acentuada, que corresponde ao escoamento da água armazenada na zona aerada do solo, e uma segunda fase, de decaimento mais suave, relacionada com o deplecionamento da água acumulada na zona saturada do solo (lençol freático) e recomenda adotar como critério para determinação da constante de recessão a ser utilizada na construção do DE, a busca do valor que produz o melhor ajuste médio entre o previsto e o verificado na faixa de vazões acima da restrição de jusante.

O volume afluente num intervalo qualquer é obtido integrando (11):

$$V_{\Delta t} = \frac{1}{a} q_0 (1 - e^{-a\Delta t}) \quad (12)$$

A equação (12) permite enunciar o seguinte problema: dada uma vazão afluente e um volume vazio disponível no reservatório, qual a vazão que assegura um volume excedente, a ser armazenado, igual ao volume disponível. O DE é construído resolvendo o problema acima para diversos valores de vazão afluente e volume vazio no reservatório. Sejam: t_0 o instante atual; q_A a vazão afluente ao reservatório no instante atual; q_D a vazão defluente do reservatório que faz com que o volume excedente a ser armazenado (V) seja igual ao volume vazio disponível (V_d); V o volume a ser armazenado no reservatório; V_d o volume vazio disponível no reservatório e t o instante em que a vazão afluente se iguala à vazão defluente. Baseado na equação (12) e fazendo $t_0 = 0$, tem-se:

$$V = \frac{q_A}{a} - \frac{q_A}{a} e^{-at} - q_D t \quad (13)$$

A equação (13) possui duas incógnitas, q_D e t . Entretanto, o valor de t é definido como o instante em que a vazão afluente se iguala à vazão defluente, portanto: $q_A e^{-at} = q_D$. Substituindo-se o valor de t em (13):

$$V = \frac{q_A}{a} - \frac{q_D}{a} - \frac{q_D}{a} \ln\left(\frac{q_A}{q_D}\right) \quad (14)$$

Fazendo-se o volume V igual ao volume vazio disponível no reservatório V_d tem-se na equação (14) uma expressão matemática onde a única incógnita é q_D . Entretanto, não é possível explicitar a variável q_D na equação (14) de forma a resolvê-la analiticamente. A resolução desta equação é feita por um processo iterativo, utilizando-se o Método do Bissecionamento (11).

Alguns reservatórios podem operar acima do seu nível máximo operativo durante um processo de amortecimento de cheias, uma vez que, em geral, o topo das comportas fechadas situa-se pouco acima do nível máximo operativo. Este tipo de operação denominada, indução de sobrecarga, é possível com a abertura parcial de todas as comportas simultaneamente. A utilização de sobrecarga pode ser feita quando o volume existente no reservatório (isolado ou equivalente) entre o nível máximo operativo e o nível máximo maximorum é maior que o volume necessário para amortecimento da cheia de projeto do vertedor. Neste caso, esta diferença pode ser utilizada para controle de cheias. Outra vantagem do uso da sobrecarga induzida é a possibilidade de se ter uma transição mais suave da vazão defluente até que se atinja a operação do vertedor em lâmina livre. A descrição da construção do DE com sobrecarga induzida pode ser encontrada em (11).

2.3 Verificação de ocorrência de situação de emergência

Como na resolução do PPL não se verifica a possibilidade de esgotamento dos volumes de espera, a cada dia a programação definida através da resolução do PPL (armazenamentos e defluências dos aproveitamentos) é testada através dos DE dos reservatórios e reservatórios equivalentes do sistema, para verificar a ocorrência de Situação de Emergência: se for indicada Situação de Emergência em algum aproveitamento ou conjunto de aproveitamentos, e se a defluência calculada pelo DE for maior que a defluência obtidas na resolução do PPL, então defluência calculado pelo DE é imposta como restrição de defluência mínima e retorna-se para a resolução do novo PPL. O processo para quando não for indicada Situação de Emergência em nenhum aproveitamento ou

conjunto de aproveitamentos do sistema, ou quando as defluências calculadas pelo DE forem iguais as defluências obtidas na resolução do PPL

3.0 - APLICAÇÃO

Considerou-se o sistema da bacia do rio Paraná até Porto São José, compreendendo 40 aproveitamentos hidroelétricos e 19 pontos de controle de cheia, estendendo-se entre as regiões sudeste e sul do Brasil, Figura 1. Nesta bacia a estação chuvosa corresponde ao período de novembro a abril. O tempo de viagem da água do aproveitamento mais a montante até o ponto de controle mais a jusante (Porto São José) é de 4 dias.

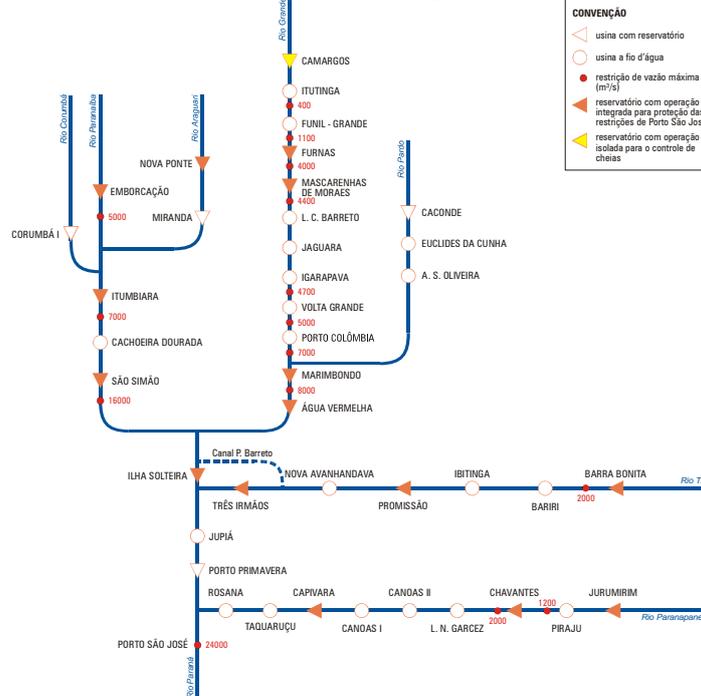


Figura 1 – Topologia do sistema da bacia do rio Paraná até Porto São José.

3.1 Simulação da programação da Cheia 96/97

No primeiro caso-exemplo deste trabalho o modelo OPCHEND foi aplicado considerando uma cheia que ocorreu nesta bacia na estação chuvosa 96/97 entre janeiro e fevereiro. Iniciou-se a simulação em 06/jan/1997 considerando os estados de armazenamento verificados na época, adotou-se como previsões as afluições diárias verificadas naquele período.

Os estudos de prevenção de cheias para a bacia do Paraná até Porto São José consideram a influência das fases da ENSO (El Niño-Oscilação Sul) no cálculo dos volumes de espera, nesta aplicação considerou-se a fase normal da ENSO e cinco conjuntos de envoltórias associados aos tempos de retorno de 30 anos (tempo de retorno recomendado nos estudos de prevenção de cheias), 25 anos, 20 anos, 15 anos e 5 anos, à exceção dos sistemas parciais da bacia do Paranapanema, onde foram utilizados os tempos de retorno de 50 anos, 40 anos, 30 anos, 20 anos e 10 anos. Para o aproveitamento de Camargos, que faz controle de cheia isolado e localiza-se na cabeceira, utilizou-se apenas o volume de espera de 50 anos.

A Figura 2 apresenta a operação dos aproveitamentos hidroelétricos Jurumirim, Chavantes, Camargo e o ponto de controle de cheia Porto São José. Jurumirim e Chavantes, localizados no rio Paranapanema, a partir do dia 28/01 entraram em situação de emergência, tendo sido verificadas defluências superiores as suas defluências máximas. A operação do aproveitamento fictício em Porto São José, que corresponde ao ponto mais à jusante do sistema e que apesar de não possuir reservatório imediatamente a montante possui DE por reservatório equivalente, não apresenta ocorrência de situação de emergência, porém sua defluência atingiu o valor máximo.

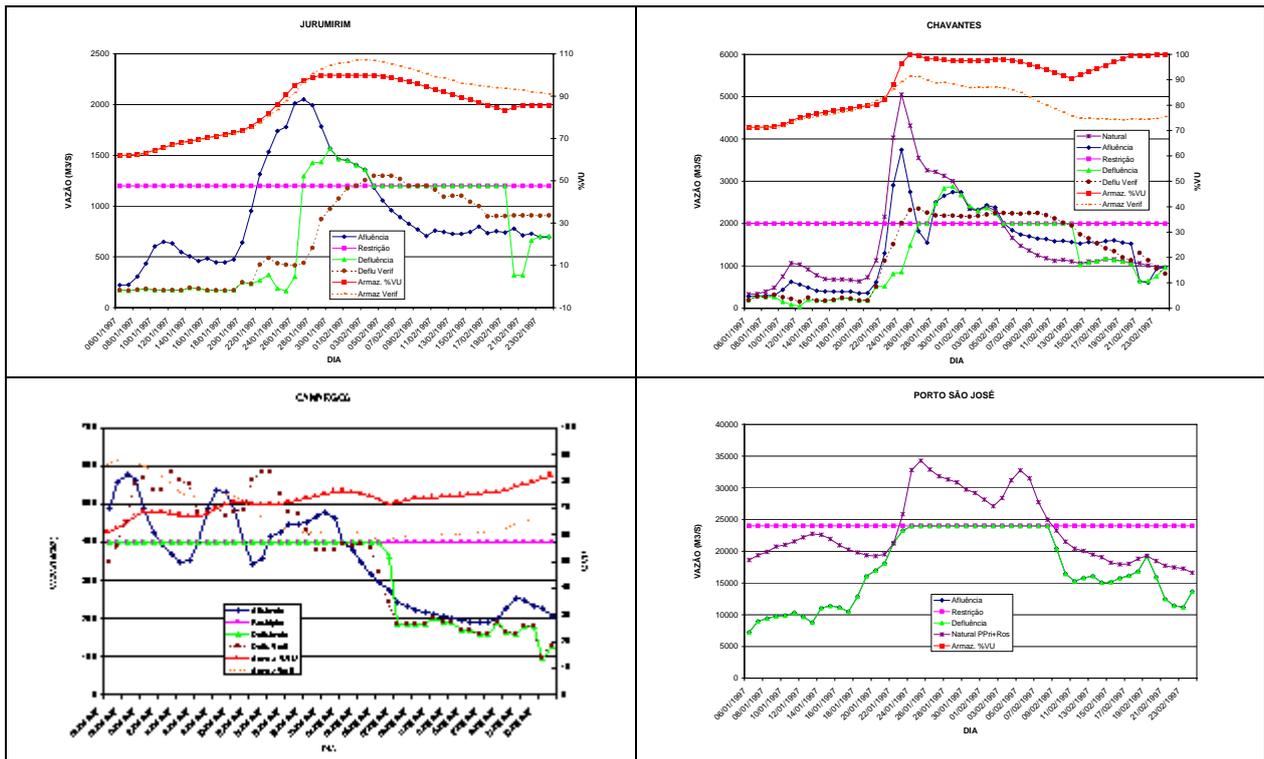


FIGURA 2 – Operação definida pelo modelo OPCHEND durante o período 06/01/97 a 23/02/97

3.2 Estratégias para redução do tempo computacional

Apesar do modelo, em geral, conseguir programar as defluências do sistema da bacia do rio Paraná de forma adequada na situação de cheia, conforme o exemplo do item 3.1, num sistema como esse (19 pontos de controle de cheia e 20 aproveitamentos pertencente ao controle de cheia integrado da bacia) o número de sistemas parciais resultante é 764, no caso de ocorrência de cheias simultaneamente em diversas sub-bacias (Paranaíba, Grande, Paranapanema, Tietê) o número de restrições ativas no PPL pode chegar a cerca de 20000, levando a um tempo de processamento incompatível com a necessidade da programação diária. Exemplos dessa situação são as programações das defluências para o dia 7/02/83 e para o dia 8/02/83, quando praticamente todo o sistema se encontrava em situação de cheia. Nesses casos as envoltórias associadas aos dois maiores tempos de retorno (30 e 25 anos, 50 e 40 anos no Paranapanema) encontravam-se violadas em praticamente todos os sistemas parciais. O tempo de processamento para obter a programação de defluência para o dia 7/02/83 foi de 2 hora e 30 minutos e para o dia 8/02/83 4 horas e 25 minutos em um Pentium IV, 2.17GHz, 1Gb RAM. Introduziu-se, então, um pré-processamento com o objetivo de checar o nível de armazenamento inicial dos sistemas parciais com o limite de armazenamento das respectivas envoltórias e eliminar as restrições relativas às n-1 envoltórias cujo nível de armazenamento fosse inferior ao nível de armazenamento inicial, escolhendo para preservar a envoltória correspondente ao nível mais alto entre elas.

Este procedimento reduziu o tempo de processamento dos dois casos mencionados para respectivamente 25 minutos e 46 minutos, tempos estes compatíveis com as necessidades da programação diária de defluências. Os resultados obtidos sem e com o pré-processamento apresentam apenas pequenas diferenças, conforme Tabelas 1 e 2, podendo-se na prática serem considerados iguais.

TABELA 1 – Aproveitamento/Pontos de controle que apresentaram diferenças sem e com pré-processamento. 7/2

| Pré-Processamento | Marimbodo | A.Vermelha | I.Solteira | Capivara | Taquaruçu | Rosana | P.S.José |
|-------------------------------------|-----------|------------|------------|----------|-----------|--------|----------|
| Afluência (m³/s) | | | | | | | |
| Sem | 8017 | 5901 | 23768 | 3172 | 7136 | 7780 | 22614 |
| Com | 8017 | 6116 | 23981 | 3172 | 7118 | 7762 | 22595 |
| Defluência (m³/s) | | | | | | | |
| Sem | 5300 | 5901 | 15738 | 7048 | 7135 | 7767 | 22614 |
| Com | 5513 | 6113 | 15738 | 7031 | 7117 | 7748 | 22595 |
| Volume Final (%) | | | | | | | |
| Sem | 98 | 100 | 88 | 9 | 100 | 100 | - |
| Com | 98 | 100 | 89 | 9 | 100 | 100 | - |

TABELA 2 – Aproveitamento/Pontos de controle que apresentaram diferenças sem e com pré-processamento 8/2

| Pré-Processamento | Marimbodo | A.Vermelha | I.Solteira | Camargos | Itutinga | S.Grande | Canoas I |
|-------------------------------------|-----------|------------|------------|----------|----------|----------|----------|
| Afluência (m³/s) | | | | | | | |
| Sem | 8057 | 8469 | 25256 | 394 | 274 | 1972 | 2046 |
| Com | 8057 | 8595 | 25382 | 394 | 400 | 1898 | 1971 |
| Defluência (m³/s) | | | | | | | |
| Sem | 7681 | 8469 | 17840 | 274 | 274 | 1972 | 2046 |
| Com | 7806 | 8595 | 17882 | 400 | 400 | 1898 | 1971 |
| Volume Final (%) | | | | | | | |
| Sem | 99 | 100 | 95 | 99 | 100 | 100 | 100 |
| Com | 99 | 100 | 86 | 98 | 100 | 100 | 100 |

4.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou os recentes desenvolvimentos do modelo OPCHEND, cujo objetivo é a programação diária da ocupação de volumes de espera em reservatórios de sistemas hidroelétricos considerando as defluências energéticas programadas para os dias seguintes, os volumes vazios reservados para a alocação das cheias, as taxas máximas de variação de defluência, as defluências máximas e os Diagramas de Emergência.

O modelo foi aplicado no sistema de reservatórios da bacia do rio Paraná até Porto São José durante a simulação da operação diária do período de 06/01/97 a 23/02/97 tendo definido uma operação de ocupação dos volumes de espera de forma a proteger Porto São José, identificando a situação de emergência no rio Paranapanema. No caso do aproveitamento Camargos, cuja operação de seu volume de espera é reservada para proteger sua restrição, o modelo manteve sua operação isolada, defluindo a restrição de 06/01 a 05/02, ocupando seu volume de espera até atingir 82,3% de seu volume útil. A análise da operação durante este período chuvoso mostra a adequação dos critérios de operação em situação normal de cheias implementados no modelo e sua capacidade de identificar situações de emergência.

A inclusão do pré-processamento para relaxar as restrições associadas às envoltórias dos sistemas parciais mostrou-se uma implementação promissora para o objetivo de redução do tempo de processamento dos casos onde ocorre cheias em toda a bacia de forma simultânea. Os tempos de processamento em um Pentium IV, 2.17GHz, 1Gb RAM para obter a programação de defluência para o dia 7/02/83 foi reduzido de 2 hora e 30 minutos para apenas 25 minutos e para obter a programação de defluência para o dia 8/02/83 foi reduzido de 4 horas e 25 minutos para apenas 46 minutos.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Maceira, M.E.P., Terry, L.A., Costa, F.S., et al, "Chain of Optimization Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in Brazilian System, Power System Computation Conference – PSCC'02, Sevilla, Spain, June 12-23, 2002.
- (2) DAMÁZIO, J. M., MARIEN, J. L., PEREIRA, M. V. F., KELMAN, J. e COSTA, F.S, "Condições de Controlabilidade de Sistemas de Reservatórios para Controle de Cheias e seu uso na Operação de Sistemas com Múltiplos Usos", Relatório Técnico CEPEL DPST-036/89, 1989.
- (3) DAMÁZIO, J. M., MARIEN, I., COSTA, F.S, "Building Flood Control Rule Curves for Multipurpose Multireservoir System Using Controllability Condition", Water Resources Research, Vol30, n04, pp1135, 1144, April, 1994.
- (4) COSTA, F.S, DAMÁZIO, J. M e KELMAN, J., "Condições de Controlabilidade de Sistemas de Reservatórios para Controle de Cheias – CAEV1", Relatório Técnico CEPEL DPST-272/901990.
- (5) COSTA, F.,S., DAMÁZIO, J. M., "Aspectos Metodológicos do Sistema SPEC- Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias em Sistemas Hidrelétricos", Relatório Técnico CEPEL, 2001.
- (6) GCOI, "Programa ARISCO – Avaliação do Risco na Operação de Controle de Cheias, Bacia do Rio Paraná", Rel SCEN/GTHO-01/96, Rio de Janeiro, 1996.
- (7) COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., ROCHA, V.F., "Regras de Operação de Controle de Cheias em Situação Normal - Modelos OPCHEN e OPCHENS", in XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, SE, 2001.
- (8) COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., "Regras de Operação Diária de Controle de Cheias em Situação Normal - Modelo OPCHEND - Manual de Metodologia", Relatório Técnico CEPEL, 2003.
- (9) COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., KYRILLOS, D.S., ROCHA, V.F., GHIRARDI, A. O, DANTAS, H. M. G., "Programação da Operação de Sistemas Hidroelétricos em Situação de Controle de Cheias Usando Técnicas de Programação Linear – Modelo OPCHEND", in XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, PR, 2003.
- (10) COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., KYRILLOS, D.S., ROCHA, V.F., GHIRARDI, A. O, DANTAS, H. M. G., PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO DE CONTROLE DE CHEIAS EM RESERVATÓRIOS DE SISTEMAS HIDROELÉTRICOS - MODELO OPCHEND, in XXI Congresso Latinoamericano de Hidraulica, São Pedro, SP, Brasil, outubro 2004.
- (11) SCEN-CECCA, "REGRAS DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS PARA CONTROLE DE CHEIAS", SCEN-CECCA-03-77, Rio de Janeiro, 1977.