

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

Fernanda da Serra Costa¹; Igor Pinheiro Raupp²; Jorge Machado Damázio³; Paulo Diniz de Oliveira⁴; Luiz Guilherme Ferreira Guilhon⁵

RESUMO – Durante a estação chuvosa, nos reservatórios das usinas hidrelétricas, são alocados espaços vazios com o intuito de amortecer possíveis cheias que possam ocorrer na bacia (volumes de espera). Em geral, na parte final da estação chuvosa, se inicia a preocupação com a questão do reenchimento dos reservatórios utilizados para controle de cheias e geração de energia elétrica, uma vez que, a não ocorrência, neste período, de aflúências capazes de encher os volumes vazios dos reservatórios, aumenta a possibilidade dos reservatórios não estarem completamente cheios no início da estação seca subsequente, prejudicando o atendimento de energia elétrica. Neste artigo é apresentada uma metodologia com o objetivo de auxiliar a tomada de decisão quanto ao relaxamento das restrições de volumes de espera nos reservatórios, através do uso de um modelo de simulação e de geração de série sintética condicionada. São também apresentados os resultados da aplicação desta metodologia no período de controle de cheias do ciclo 2006/2007 da bacia do rio Paraná.

ABSTRACT - During the rainy season, in the hydro plants reservoirs, empty spaces are allocated in order for attenuation of possible floods that might occur in the river basin (waiting volumes). In general, at the end of the rainy season begins the concern about the refilling of the reservoirs used for flood control and energy generation, since the non-occurrence of inflows able to fill the waiting volumes, increases the possibility reservoirs not completely filled at the beginning of the subsequent dry season, affecting the energy generation. This article presents a methodology to assist the decision making regarding the relaxation of the waiting volumes restrictions, using a simulation model and synthetic series conditional generation. The article also presents the results of the applicability of this methodology in the 2006/2007 flood control period in Paraná River basin.

Palavras-chave: operação de controle de cheias, recuperação de armazenamento, hidroeletricidade.

¹ Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, Universidade do Estado do Rio de Janeiro-UERJ. Av. Horácio Macedo, 354 – Rio de Janeiro. E-mail: fernanda@cepel.br

² Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, Av. Horácio Macedo, 354 – Rio de Janeiro. E-mail: raupp@cepel.br

³ Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, Universidade do Estado do Rio de Janeiro-UERJ. Av. Horácio Macedo, 354 – Rio de Janeiro. E-mail: damazio@cepel.br

⁴ Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, Rua da Quitanda 196/10º, 20091-000 Rio de Janeiro, RJ. E-mail diniz@ons.org.br

⁵ Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, Rua da Quitanda 196/10º, 20091-000 Rio de Janeiro, RJ. E-mail guilhon@ons.org.br

1 – INTRODUÇÃO

Os estudos de prevenção de cheias no Sistema Interligado Nacional – SIN - estabelecem a alocação de volumes vazios nos reservatórios a fim de reduzir danos causados por cheias de grande porte em áreas a jusante dos reservatórios. Estes volumes vazios, também chamados de volumes de espera, são adotados para o período úmido (meses de novembro a abril para a bacia do rio Paraná), sendo definidos a partir do estabelecimento de restrições operativas hidráulicas e da escolha do grau de proteção contra inundação a ser adotado, expresso através do Tempo de Retorno (TR).

O período de controle de cheias na bacia do rio Paraná, referente ao ciclo 2006-2007, caracterizou-se pela ocorrência de uma cheia significativa decorrente de intensa precipitação verificada sobre as regiões Sudeste e Centro-Oeste. Durante esta cheia, foram observadas vazões naturais afluentes superiores às restrições de vazões máximas em alguns locais, que acarretaram o uso de praticamente todo o volume de espera disponível em diferentes reservatórios na bacia do rio Paraná para o controle desta cheia. Em avaliação realizada a partir do histórico de vazões disponível no local da UHE Jupuíá, principal restrição na bacia do rio Paraná, esta cheia foi classificada como a 2ª maior cheia do histórico.

Entretanto, terminado o mês de fevereiro de 2007, os reservatórios da bacia do rio Paraná estavam próximos de suas capacidades máximas de armazenamento e ainda restavam dois meses do período de controle de cheias naquela bacia – março e abril. Como as perspectivas meteorológicas e climáticas não apontavam previsões de chuvas significativas e, conseqüentemente, vazões elevadas na bacia do rio Paraná, a questão era: recompor os volumes vazios nos reservatórios para garantir a proteção de uma eventual nova cheia ou manter os reservatórios cheios e assegurar a recuperação dos níveis visando garantir os armazenamentos de água para o período seco seguinte.

A metodologia adotada naquela ocasião para a operação hidráulica de controle de cheias dos meses de março e abril de 2007 utilizou de forma qualitativa as informações de previsão meteorológica, as cheias históricas verificadas neste período e simulações a sistemas equivalentes dos reservatórios a montante dos principais pontos de restrição de vazão máxima. Esta metodologia não se mostrava completamente aderente à metodologia utilizada no planejamento da operação de controle de cheias, conforme Plano Anual de Controle de Cheias.

Face à necessidade de uma metodologia para a recuperação dos volumes de espera ao final do período de controle de cheias que fosse o mais aderente possível à metodologia utilizada no planejamento da operação de controle de cheias, o ONS contratou o CEPTEL para o seu desenvolvimento e aplicação. Como estudo de aplicação foram escolhidos exatamente os meses finais do período de controle de cheias do ciclo 2006/2007, ou seja, março e abril de 2007.

Este artigo tem como objetivo descrever a metodologia desenvolvida para a recuperação dos volumes de espera ao final do período de controle de cheias e apresentar os resultados do estudo de aplicação dessa metodologia para o período de controle de cheias do ciclo 2006/2007 na bacia do rio Paraná.

2 – METODOLOGIA PARA OPERAÇÃO DE CONTROLE DE CHEIAS

Na metodologia atualmente em uso nos estudos de prevenção de cheias para representar a estocasticidade das aflúências são consideradas séries sintéticas de vazões diárias geradas pelo modelo DIANA (KELMAN et al, 1983 e COSTA et al, 1999). Como estes estudos são realizados com bastante antecedência em relação ao início da estação chuvosa e, portanto, as vazões dos dias que antecedem o 1º dia da estação chuvosa são desconhecidas, as séries sintéticas de vazões diárias são geradas de forma não condicionada. Nesta metodologia, para definição dos volumes de espera em sistemas de reservatórios (COSTA et al, 1999), o sistema de reservatórios analisado é decomposto em sistemas parciais, representando-se cada sistema parcial por um reservatório equivalente, para o qual calcula-se um conjunto de curvas-guias superiores para toda a estação chuvosa, chamadas envoltórias (DAMÁZIO et al, 1994). Cada envoltória é associada a um risco (tempo de retorno) previamente definido. O problema da desagregação espacial das envoltórias de reservatórios equivalentes em curvas individualizadas para cada reservatório do sistema é formulado como um problema linear estocástico com função objetivo refletindo interesses da geração de energia elétrica, (DAMÁZIO, 1988).

Na operação dos reservatórios, durante a estação chuvosa, a ocorrência de uma cheia provoca a necessidade de ocupação dos volumes de espera calculados anteriormente e alocados nos reservatórios. De forma análoga, após a passagem da cheia é necessário o esvaziamento dos reservatórios para retornar aos níveis dos volumes de espera definidos nos estudos de prevenção de cheias. A ocupação e o esvaziamento dos volumes de espera devem ser feitos de forma criteriosa, de modo a minimizar o aumento do risco de danos no vale a jusante.

Para auxiliar na solução deste problema, o modelo OPCHEN (CEPEL, 2010 e COSTA et al, 2001) foi desenvolvido pelo CEPEL, com o objetivo de planejar como se dará em cada semana (no máximo cinco semanas) a ocupação (ou o esvaziamento) dos volumes de espera dos reservatórios de uma bacia.

2.1 – Modelo OPCHEN

A operação da ocupação dos volumes de espera dos reservatórios é feita através da solução de um problema de programação linear (PPL), sujeito à situação hidrológica atual (volumes armazenados e aflúências previstas para a semana) e ao atendimento ao final de cada semana do

conjunto de envoltórias dos sistemas parciais que compõe a bacia. A consideração do conjunto de envoltórias permite acompanhar a evolução do risco de cheias à medida que os volumes de espera vão sendo ocupados.

Para cada restrição do PPL, são associadas variáveis de folgas, as quais são penalizadas na função objetivo do problema (Eq. 1), portanto, sempre que possível será atribuído valor nulo (zero) às variáveis de folga de forma a minimizar o valor da função objetivo.

$$FunçãoObjetivo = Min \sum_{j=1}^{nrestr} \sum_{t=1}^{nsem} penalidades(j,t) \times folgas(j,t) \quad (1)$$

Sujeito a restrições para cada semana t de:

- i. balanço de cada aproveitamento;
- ii. defluências mínimas (em geral, defluência energética) para cada aproveitamento;
- iii. volume meta (volume alcançado com a operação energética) por aproveitamento;
- iv. volumes de espera dos sistemas parciais associados aos conjuntos de envoltórias (cada qual associado a tempos de retorno diferentes) para cada sistema parcial;
- v. taxas de variação máxima de defluência semanal de cada aproveitamento;
- vi. defluências máximas dos aproveitamentos com ponto de controle de cheia a jusante (defluências acima das quais, danos poderão ser causados a jusante).

A ordem de “violação das restrições” (atribuição de valores diferentes de zero às variáveis de folga das restrições) está associada, entre outros fatores, aos valores de sua penalidade. Os valores das penalidades refletem o tipo de operação de controle de cheias que se deseja. De uma forma bastante simplificada a regra de operação de controle de cheias consiste em:

- Se não estiver ocorrendo cheia, manter os volumes de espera vazios;
- Na ocorrência de cheia (vazão afluente superior à vazão de restrição), defluir a vazão de restrição, permitindo a ocupação dos volumes de espera;
- Após a ocorrência da cheia (quando a vazão afluente torna a ser inferior a vazão de restrição), operar de forma a retornar aos níveis dos volumes de espera.

3 – METODOLOGIA PARA RELAXAMENTO DE RESTRIÇÕES DE VOLUMES DE ESPERA

Em geral, é na parte final da estação chuvosa que se inicia a preocupação com a questão do reenchimento dos reservatórios do setor elétrico utilizados para o controle de cheias. Neste período a probabilidade de ocorrência de grandes cheias diminui e, portanto, não ocorrendo afluições capazes de encher os volumes de espera definidos nas envoltórias, existe a possibilidade dos volumes dos reservatórios utilizados também para controle de cheias não estarem completamente cheios ao início da estação seca.

A metodologia proposta para auxiliar a tomada de decisão quanto ao relaxamento das restrições de volumes de espera consiste em utilizar os resultados de uma simulação, para um horizonte de até cinco semanas, com o programa OPCHEN considerando as regras de operação de controle de cheias modificadas (conforme descrição no item 3.1) e vazões afluentes aos aproveitamentos geradas pelo modelo DIANA de forma condicionada e associada ao risco do período (conforme descrição no item 3.2) (CEPEL, 2011).

3.1 – Modelo OPCHEN para relaxamento das restrições de volumes de espera

Para realizar a simulação, cujos resultados auxiliarão a tomada de decisão quanto ao relaxamento das restrições de volumes de espera, as regras de operação implementadas no modelo OPCHEN foram alteradas, passando a permitir o relaxamento destas restrições. Sendo assim, nos meses finais da estação chuvosa, passa a ser possível adotar a seguinte regra de operação: (i) após a ocorrência de uma cheia, não é mais necessário retornar o nível dos reservatórios ao nível requerido pelos volumes de espera (envoltórias) e (ii) passa a ser permitido o enchimento dos reservatórios quando a vazão afluente for capaz de atender a necessidade de geração e também de elevar o armazenamento do reservatório a um nível superior ao da envoltória.

De acordo com a metodologia, só é permitida a alteração da regra de operação nos meses finais da estação chuvosa e nas primeiras semanas do horizonte, devendo-se retornar a regra de operação de controle de cheia (descrita no item 2.1) na última semana do horizonte de simulação. Assim, dependendo do período da estação chuvosa, o modelo OPCHEN será orientado por regras de operação diferentes. Para o período em que se deseja verificar a possibilidade de relaxamento das restrições de volume de espera, a regra de operação passaria a ser:

- Na ocorrência de cheia, defluir a vazão de restrição, permitindo a ocupação dos volumes de espera; e

- Ao final do horizonte da simulação, respeitar o volume de espera da envoltória, ou seja, manter a restrição de volume de espera.

Caso utilizando esta nova regra de operação, a simulação encontre, para uma série de afluições previstas, uma operação que respeite as restrições de volumes de espera na última semana do horizonte e as demais restrições durante todas as semanas, então há uma indicação de que será possível, caso ocorram as afluições previstas, utilizar os volumes de espera sem causar danos na bacia durante as semanas do horizonte da simulação e retornar ao nível requerido pelos volumes de espera na última semana, a partir da qual não se possui mais informações naquele momento.

Para a preservação do risco definido no cálculo dos volumes de espera, além de simulação com uma série de afluições previstas, deve ser realizada também uma simulação com a série sintética gerada pelo modelo DIANA de forma condicionada às últimas afluições diárias observadas e associada ao risco do período restante da estação chuvosa, conforme descrição no item 3.2. Se esta simulação resultar em uma operação que também respeite as restrições de volumes de espera na última semana do horizonte e as demais restrições durante todas as semanas, então caso ocorram afluições iguais a série associada ao risco do período, também será possível utilizar os volumes de espera sem causar danos na bacia durante as semanas do horizonte da simulação e retornar ao nível requerido pelos volumes de espera na última semana

Este procedimento seria realizado todas as semanas do período final da estação chuvosa. O número de semanas em que as restrições de volume de espera seriam removidas dependerá das informações disponíveis para a tomada de decisão.

3.2 – Modelo DIANA condicionado

Suponhamos que a parte final da estação chuvosa para uma determinada bacia corresponda aos meses de março e abril, assim a data para iniciar o processo de relaxamento das restrições de volumes de espera, seria 1ª março. Neste caso, o modelo DIANA seria utilizado para a geração de séries sintéticas condicionadas às duas últimas vazões observadas, ou seja, as vazões dos dias 27 e 28 de fevereiro.

Após a geração das séries sintéticas de vazões diárias condicionadas, é possível escolher a série que deverá ser utilizada na simulação com o modelo OPCHEN. A escolha da série é feita ordenando-se as séries através de um parâmetro de severidade em relação à cheia, por exemplo, máximo volume de espera de cada série. A série escolhida será aquela cuja ordem corresponde ao número de séries não condicionadas que não foram protegidas no período de março-abril na etapa de cálculo dos volumes de espera (Estudo de Prevenção de Cheias) mais um. O número de séries

não condicionadas não protegidas no período de março-abril é obtido através do programa CAEV versão 3.8 (COSTA et al, 1999).

3.3 – O Procedimento para relaxamento das restrições de volumes de espera

Durante os dois últimos meses da estação chuvosa no PMO e nas suas revisões o uso do modelo OPCHEN para auxiliar a tomada de decisão de relaxamento das restrições de volumes de espera, deve continuar a ser feita de forma iterativa com o modelo de planejamento de curto prazo DECOMP (CEPEL, 2002; PIMENTEL, 2005)¹. O modelo OPCHEN é executado a cada semana relaxando as restrições de volume de espera nas primeiras semanas de cada execução e mantendo tais restrições na última semana do horizonte.

Para auxiliar a tomada de decisão quanto ao relaxamento das restrições de volumes de espera, a iteração entre os modelos DECOMP/OPCHEN se daria da seguinte forma:

- Considera-se para a execução do modelo OPCHEN o período de cinco semanas com horizonte limitado ao final da estação chuvosa no último mês;
- o modelo OPCHEN recebe as seguintes informações provenientes da execução do modelo DECOMP: defluências energéticas (turbinadas) e volumes armazenados iniciais para a 1ª semana;
- o modelo OPCHEN é executado duas vezes, considerando como afluência a série gerada pelo DIANA condicionado, associada ao risco do período, e, também, as previsões de afluências. Na simulação com a série sintética três situações são possíveis:
 - as restrições de volumes de espera foram respeitadas na última semana da simulação: neste caso é possível relaxar as restrições de volume de espera e os volumes armazenados resultantes da execução do modelo OPCHEN com a série gerada pelo modelo DIANA são fornecidos ao modelo DECOMP;
 - as restrições de volumes de espera não foram respeitadas na última semana da simulação: então, a bacia encontra-se em estado de controle de cheias e, portanto, as restrições de volumes de espera ainda não podem ser relaxadas (eliminadas nas semanas iniciais da simulação) visando o reenchimento dos reservatórios;
 - as restrições de limites máximos de defluências não foram respeitadas em alguma(s) semana(s) da simulação para algum(s) ponto(s) de controle: então, a bacia encontra-

¹ O modelo DECOMP busca obter a operação que minimiza o custo total de operação, respeitando as diversas restrições físicas e operativas do sistema e atendendo à demanda requerida em cada intervalo de tempo.

se em estado de controle de cheias e, portanto, as restrições de volumes de espera ainda não podem ser relaxadas;

- nos casos em que foi possível adotar o procedimento para relaxamento das restrições de volumes de espera, o modelo DECOMP re-despacha as usinas atendendo, entre outras restrições, aos níveis de armazenamento provenientes do modelo OPCHEN como limites máximos, os quais foram definidos relaxando as restrições de volumes de espera.

4 – APLICAÇÃO

4.1- Prevenção de cheias na bacia do rio Paraná

A bacia do rio Paraná até Porto São José (posto fluviométrico situado no rio Paraná, a jusante da foz do rio Paranapanema), é a mais importante do subsistema Sudeste/Centro-Oeste do SIN, pois está localizada num eixo de grande desenvolvimento do país. Sua área de drenagem até Porto São José é de 673.000 km² e abrange áreas do Distrito Federal e dos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná e São Paulo. Seu sistema de aproveitamentos hidrelétricos é formado por 17 reservatórios abrangendo, além do trecho do rio Paraná, os rios Paranaíba, Corumbá, Araguari, Grande, Pardo, Tietê e Paranapanema. São consideradas 18 restrições de vazões máximas distribuídas ao longo de seu curso principal e de seus afluentes, dentre as quais se pode destacar a restrição de 4.400 m³/s em Mascarenhas de Moraes devido a inundação da sua casa de força, 7.000 m³/s em Itumbiara visando evitar a inundação de áreas da cidade de Itumbiara, 16.000 m³/s em Jupia e 24.000 m³/s no posto fluviométrico de Porto São José ambas para proteção de comunidades ribeirinhas a jusante destes aproveitamentos. Estas duas últimas restrições de vazões máximas podem ser consideradas as mais críticas devido à pequena frequência em que ocorrem vazões naturais iguais ou superiores a seus valores, na média de uma vez a cada 2 anos em Jupia e de uma vez a cada 3 anos em Porto São José, além dos danos envolvidos.

A Figura 1 apresenta o Diagrama esquemático do sistema de aproveitamentos hidrelétricos da bacia do rio Paraná até Porto São José no ciclo de controle de cheias entre os anos de 2006/2007.

O período de controle de cheias nesta bacia é de novembro a abril, com exceção dos reservatórios de Barra Bonita na bacia do rio Tietê e, Jurumirim e Chavantes na bacia do rio Paranapanema. O reservatório de Barra Bonita tem seu período de controle de cheias estendido até junho. Os reservatórios de Jurumirim e Chavantes apresentam volumes de espera também no período de maio a outubro, visando apenas à proteção das restrições localizadas na própria bacia, em razão da inexistência de uma sazonalidade bem definida das vazões, que ora sofrem influência

do regime de chuvas predominante da região Sudeste, ora estão sob o regime de chuvas da região Sul.

Conforme a metodologia adotada para o cálculo dos volumes de espera nesta bacia, é realizada uma distribuição espacial dos volumes pelos reservatórios com capacidade de amortecimento de cheias. Desta forma, para a proteção de restrições como as de Jupia e de Porto São José, que se referem a locais que não têm capacidade para a alocação de volume de espera, e de um posto fluviométrico, são alocados volumes distribuídos por 11 e 13 reservatórios, respectivamente situados a montante desses locais.

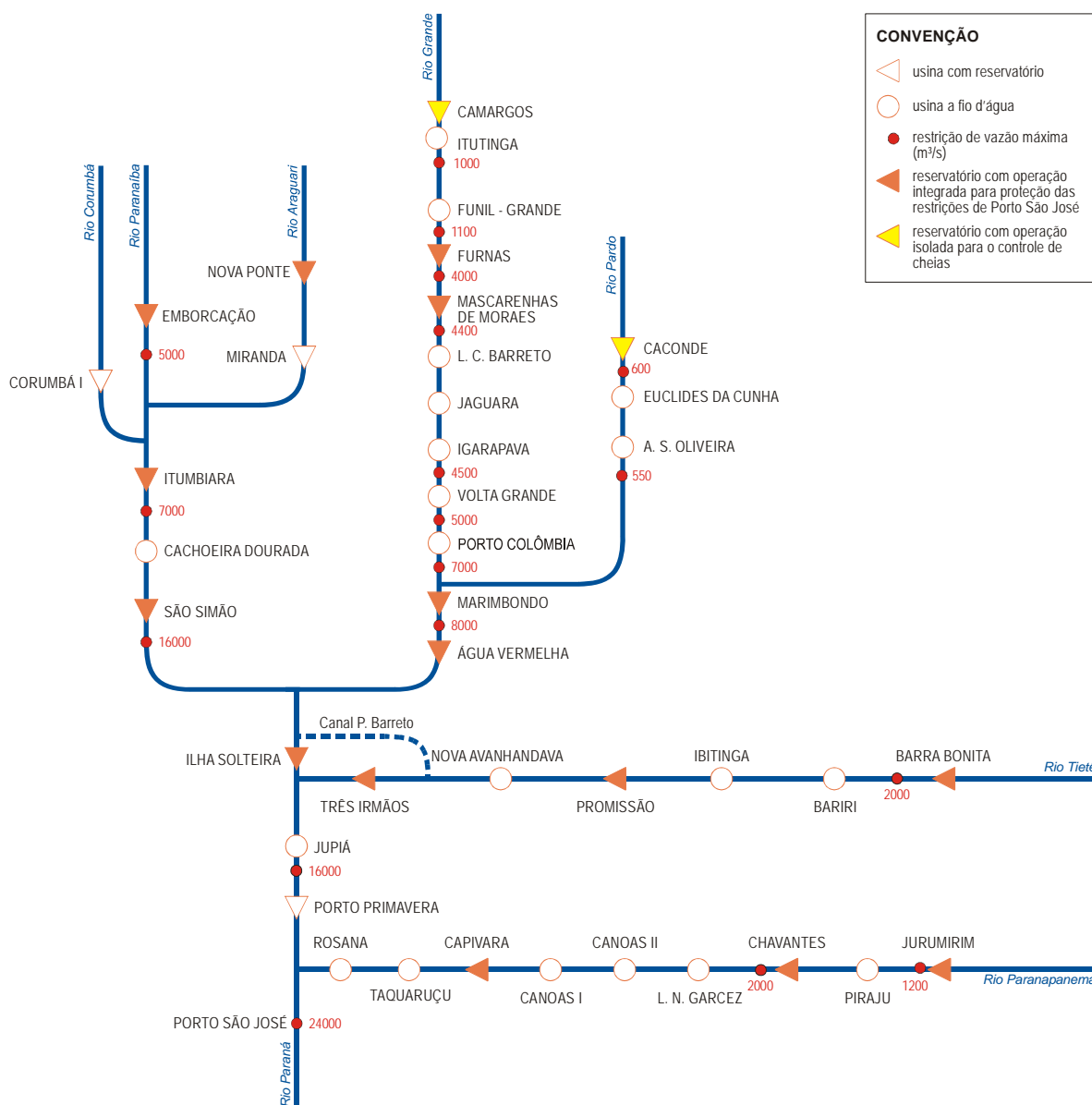


Figura 1 - Diagrama esquemático do sistema de aproveitamentos hidrelétricos da bacia do rio Paraná até Porto São José no ciclo de controle de cheias entre os anos de 2006/2007.

O total de alocação de volumes de espera no sistema de reservatórios da bacia do rio Paraná a montante de Porto São José para o ciclo 2006-2007 é apresentado na Figura 2. O valor máximo de

alocação de volumes de espera foi de cerca de 18 km³. Esta alocação máxima, em janeiro, corresponde aproximadamente a todo o volume útil do reservatório de Furnas, que é de 17,2 km³, ou equivale à soma dos volumes úteis dos reservatórios de Mascarenhas de Moraes, Marimbondo, Água Vermelha e São Simão.

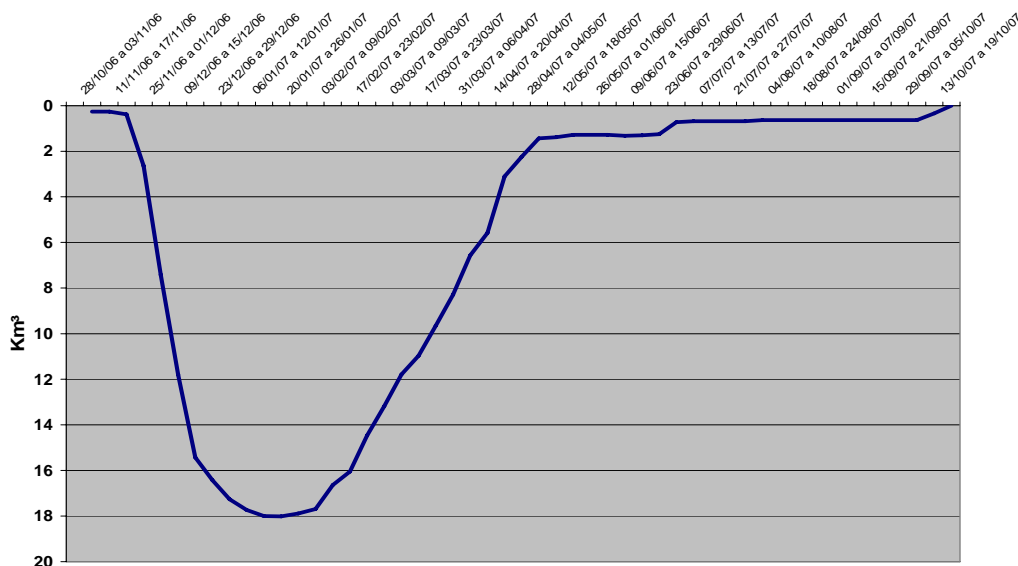


Figura 2 – Alocação total de volumes de espera na bacia do rio Paraná até Porto São José.

4.2- Avaliação Hidrometeorológica da Cheia de 2007

Avaliação meteorológica

De dezembro de 2006 a janeiro de 2007 a bacia do rio Paraná apresentou anomalia positiva de precipitação em relação às médias históricas. Os totais de precipitação foram superiores às médias em até 150mm, como apresentado na Figura 3. Esse comportamento da precipitação no mês de dezembro foi decorrente da passagem de frentes frias pela região Sudeste que organizou a nebulosidade no interior do país e, em janeiro, devido à configuração de vários episódios da Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS. A ZCAS é definida como uma banda de nebulosidade que se estende desde o sul da Amazônia até o oceano Atlântico Sul, bem caracterizada nos meses de verão, e que normalmente está associada à ocorrência de casos severos de chuvas prolongadas. O número de dias chuvosos no mês de janeiro nas bacias dos rios Tietê e Paranapanema foi superior a 20, e em torno de 30 dias nas bacias dos rios Grande e Paranaíba.

Com o posicionamento da ZCAS mais ao norte, com localização sobre os estados da Bahia, Goiás e Tocantins, a partir da segunda quinzena do mês de fevereiro, verificou-se uma diminuição significativa da precipitação nas bacias dos rios Tietê e Grande. Nessas bacias o total de

precipitação de fevereiro de 2007 correspondeu a 70% da média histórica. Nas bacias dos rios Paranapanema e Paranaíba a precipitação ficou próxima à média histórica.

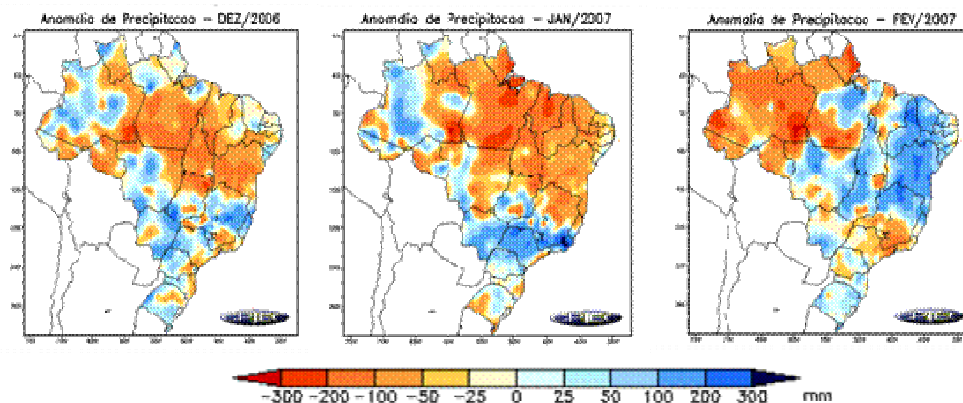


Figura 3 - Anomalia de precipitação observada nos meses de dezembro de 2006, janeiro e fevereiro de 2007 (fonte: CPTEC, 2007).

Avaliação hidrológica

A persistência de chuvas com intensidades de moderada a forte nas bacias dos rios Grande, Paranaíba e no trecho do rio Paraná a montante de Ilha Solteira, levou as vazões naturais médias mensais de janeiro/2007 a serem as maiores ocorridas nesse mês em todo o histórico (1931-2007) em São Simão, Água Vermelha, Ilha Solteira e Jupia. As vazões em fevereiro/2007 foram as 2ª maiores médias mensais nestes locais, só sendo inferiores àquelas ocorridas em fevereiro/1983, exceto em Água Vermelha, cuja vazão em fevereiro/2007 foi a 7ª maior.

Na figura 4 são apresentados os hidrogramas de vazões naturais observados no período de janeiro a abril/2007 nos aproveitamentos de Água Vermelha no rio Grande, de São Simão no rio Paranaíba, de Três Irmãos no rio Tietê e de Jupia no rio Paraná, bem como o observado no rio Paraná em Porto São José.

Na Tabela 1 são apresentados os anos que ocorreram cheias com maiores volumes excedentes às vazões de restrição em Porto São José, Jupia, Itumbiara e Mascarenhas de Moraes, consideradas as mais críticas do sistema de reservatórios da bacia do rio Paraná.

Em termos de volumes excedentes a cheia de 2007, conforme pode ser visto na Tabela 1, representa o 10º maior valor em Mascarenhas de Moraes, o 6º maior valor em Itumbiara, o 2º maior valor em Jupia e o 3º maior valor em Porto São José. Em Jupia, o volume total acima da vazão de restrição (22,91km³) é mais de 70% superior ao terceiro maior registrado (13,23km³, em 1931), o que mostra a magnitude da cheia nesse local.

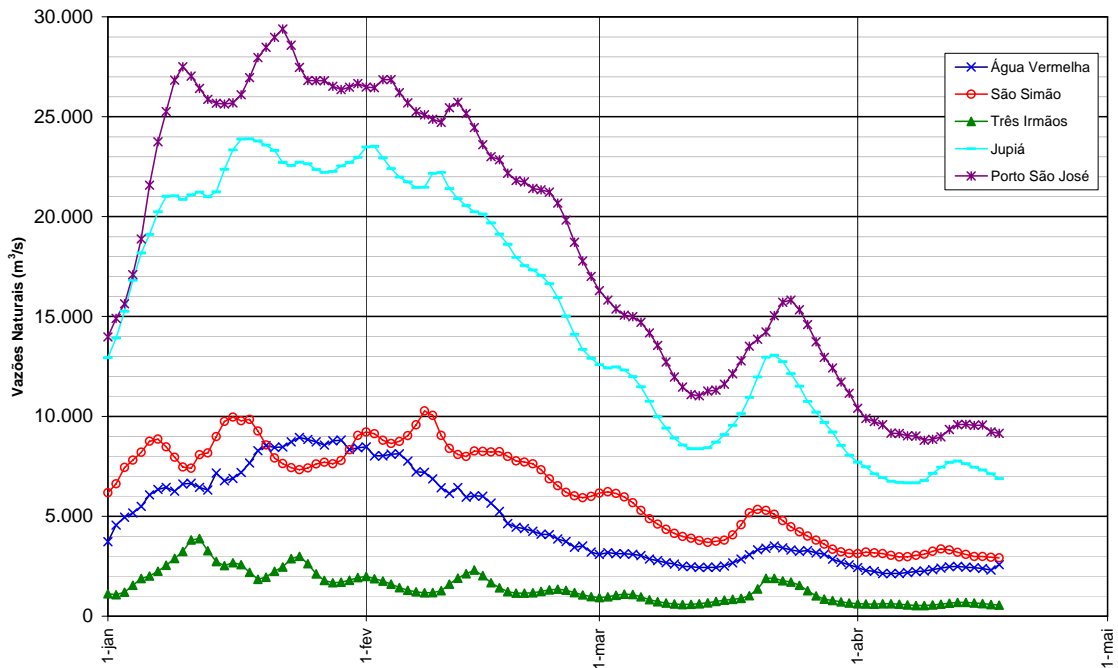


Figura 4 - Hidrogramas de vazões naturais observados de janeiro a abril/2007.

Tabela 1 – Anos de ocorrência das maiores cheias em Porto São José, Jupia, Itumbiara e Mascarenhas de Moraes.

Ordem	PORTO SÃO JOSÉ		JUPIÁ		ITUMBIARA		M. DE MORAES	
	(período: 1931/2007)		(período: 1931/2007)		(período: 1974/2007)		(período: 1931/2007)	
	ANO	Restrição: 24.000m ³ /s	ANO	Restrição: 10.000m ³ /s	ANO	Restrição: 7.000m ³ /s	ANO	Restrição: 4.400m ³ /s
1	1983	21,20	1989	95,91	1989	1,72	1982	1,76
2	1997	8,88	2007	22,91	1982	0,45	1947	1,05
3	2007	8,07	1931	13,23	1979	0,24	1985	0,82
4	1990	7,71	1982	10,81	1980	0,20	1946	0,78
5	1931	2,16	1985	6,72	1982	0,18	1987	0,40
6	1995	1,88	1947	6,82	2007	0,14	1988	0,39
7	2005	0,58	1985	6,30	1985	0,12	1983	0,36
8	1982	0,17	1985	5,74	1997	0,05	2000	0,32
9	1977	0,02	1997	5,73	1991	0,02	1987	0,27
10	1993	0,00	1981	5,51			2007	0,22
11	1982	0,00	1982	5,41			1984	0,21

Nota: Volumes correspondentes às vazões excedentes às vazões de restrição

4.3- Adaptações/Simplificações para as simulações

De forma a simular a utilização do modelo OPCHEN e DIANA nos Programas Mensais de Operação (PMOs) e suas revisões para a cheia 2007 na bacia do rio Paraná, foram feitas as seguintes considerações:

- Volumes iniciais da primeira semana de cada execução do modelo OPCHEN: Considerou-se como volumes armazenados iniciais para a 1ª semana do PMO do mês em que se iniciou a tentativa de relaxamento das restrições de volumes de espera, os

volumes verificados no início desta semana. A partir da revisão 1 do mês em que se iniciou a tentativa de relaxamento das restrições de volumes de espera, passa-se a considerar como volumes armazenados iniciais para a 1ª semana de cada revisão os volumes resultantes da operação definida na simulação com o modelo OPCHEN na revisão anterior, utilizando como afluência a série gerada pelo modelo DIANA condicionado;

- Vazões afluentes: Foram consideradas duas alternativas, afluências previstas e afluências correspondentes a série condicionada gerada pelo modelo DIANA e associada ao risco do período;
- Defluências energéticas: Considerou-se como defluência energética a vazão turbinada definida pelo modelo DECOMP em cada PMO/revisão. Quando não se dispunha desta informação (casos em que o horizonte do PMO/revisões era menor que 5 semanas), a defluência energética foi mantida constante e igual a da última semana do horizonte do PMO/revisões, por exemplo, nas semanas finais do PMO/revisões do primeiro mês de tentativa de relaxamento das restrições de volumes de espera, uma vez que o horizonte de cada revisão era menor que 5 semanas. Para o último mês da estação chuvosa, os horizontes das simulações foram iguais aos horizontes do PMO/revisões.

4.4- Simulação para operação de controle de cheias

A Tabela 2 apresenta os volumes armazenados iniciais e finais da 1ª semana obtidos pelo modelo OPCHEN para o PMO-abril e suas revisões e a 1ª semana do PMO-maio, que correspondem às semanas 23 a 27 da estação chuvosa. Em todas as semanas, para todos os pontos de controle de cheia, o estado de operação foi igual a zero (0), indicando não se encontrar em situação de cheia. Na última semana da estação chuvosa oito aproveitamentos não atingiram 100% de armazenamento: Furnas (99,07%), Água Vermelha (81,81%), São Simão (95,63%), Barra Bonita (89,95%), Promissão (99,8%), Ilha Solteira-equivalente (97,86%), Jurumirim (83,15%) e Xavantes (74,97%).

Na Figura 5 pode-se observar que o nível de armazenamento do sistema parcial SP176 (formado por Jupia e todos os aproveitamentos a montante) esteve sempre abaixo do nível de armazenamento de sua envoltória, não atingindo 100% de armazenamento na última semana, mesmo mantendo a defluência igual à energética.

Tabela 2 – Armazenamentos iniciais e finais obtidos pelo programa OPCHEN com aflúências previstas SEM relaxamento das restrições de volumes de espera. PMO/Revisões de Abril.

	inicial	ABRIL				MAIO
		23	24	25	26	27
Furnas	97.87	99.06	99.84	100.00	100.00	99.07
MMoraes	91.97	86.84	92.55	99.77	100.00	100.00
Igarapava						
VGrande						
PColombia						
Marimbondo	84.55	93.49	95.48	97.55	100.00	100.00
AVermelha	99.13	80.00	74.15	68.07	72.81	81.81
Emborcacao	99.08	99.46	98.77	99.69	100.00	99.88
NPonte	100.00	99.85	99.83	99.88	99.76	99.70
Itumbiara	95.97	96.88	98.79	99.54	100.00	100.00
SSimao	102.03	80.00	83.93	86.17	89.77	95.63
BBonita	89.86	89.29	88.54	88.30	89.29	89.95
Promissao	98.26	97.65	96.20	98.64	100.00	99.80
ISolteira-Eq	96.54	89.17	90.00	93.88	95.80	97.86
Jupia						
Jurumirim	81.53	82.79	82.96	83.53	83.72	83.15
Xavantes	68.63	70.42	71.63	73.06	74.29	74.97
Capivara	97.70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
P,S,Jose						
	vol inicial	OPC	OPC	OPC	OPC	OPC

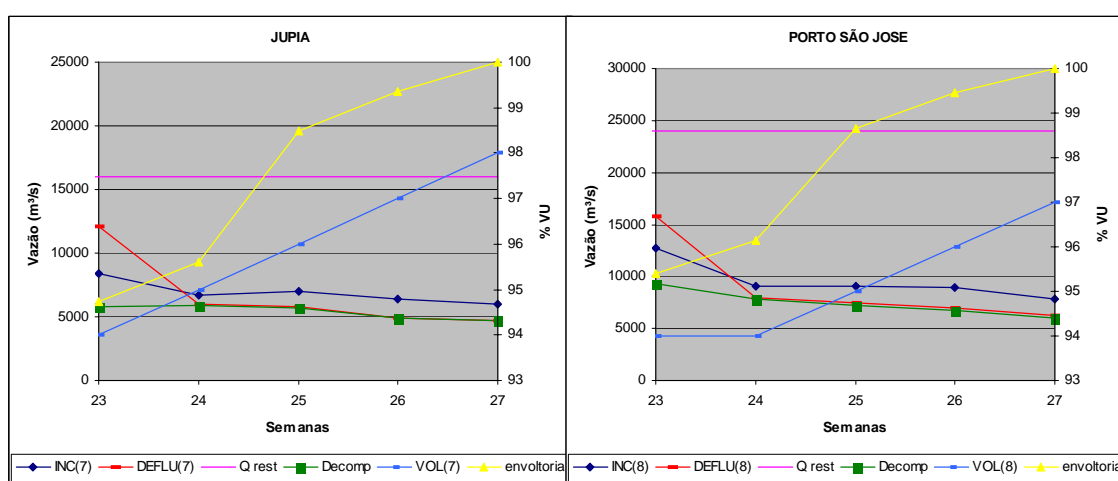


Figura 5 – Evolução do volume armazenado (VOL), aflúência (INC), defluências total (DEFLU) e energética (Decomp), envoltória para os sistemas parciais SP176 e SP760 (Porto São José + todos os aproveitamentos a montante). Simulação sem relaxando as restrições de volumes de espera.

4.5 – Simulação com relaxamento das restrições de volume de espera

Para a simulação considerando relaxamento das restrições de volume de espera foram necessários primeiro: (i) determinação do risco no período março-abril e, (ii) geração das séries condicionadas pelo modelo DIANA e escolha da série a ser simulada no OPCHEN.

Determinação do risco no período entre março-abril

Para determinação do risco no período de março-abril, calculou-se o número de séries sintéticas (geradas pelo modelo DIANA antes do início da estação chuvosa) do conjunto utilizado para o cálculo das envoltórias que não foram protegidas neste período.

Como o número de séries não protegidas pode variar de um ponto de controle para outro, deve-se escolher um ponto de controle para a definição do risco no período. No estudo realizado, escolheu-se o ponto de controle a jusante de Jupuíá, por ser a restrição associada a este ponto de controle a mais severa da bacia, e a jusante deste ponto de controle a bacia só possui o ponto de controle de Porto São José, cuja severidade de sua restrição é inferior. Ressalta-se que estudos considerando outros pontos de controle da bacia podem ser realizados.

Considerando o conjunto de séries sintéticas geradas através do modelo DIANA, pelo ONS, para os Estudos de Controle de Cheias para o ciclo 2006/2007 e o ponto de controle a jusante de Jupuíá, e utilizando-se o programa CAEV, obteve-se como resultado que neste período, apenas quatro (04) séries sintéticas não foram protegidas, isto é, necessitavam de volumes de espera superiores aos requeridos pela envoltória calculada para este ponto de controle.

Geração pelo modelo DIANA das séries condicionadas e escolha da série a ser simulada

Para cada semana operativa o modelo DIANA é executado na opção “geração condicionada” considerando como afluências passadas as vazões diárias verificadas nos dois dias anteriores ao primeiro dia da série a ser gerada (primeiro dia da primeira semana do PMO/revisões). Cada execução do modelo DIANA resulta em um conjunto de 12.000 séries sintéticas condicionadas.

Após a geração de cada conjunto de séries sintéticas seleciona-se a série associada ao risco do período março-abril. No estudo realizado a série selecionada foi a de ordem 5 (cinco).

Simulação com o modelo OPCHEN

O modelo OPCHEN foi executado a partir da primeira semana operativa de março de 2007 (PMO-mar/2007). Entretanto, no PMO de março/2007 e suas três revisões, de acordo com os critérios para relaxamento das restrições de volumes de espera apresentados no item 3.2, não foi possível relaxar as restrições de volumes de espera. Ressalta-se que os volumes armazenados no início do mês de março, utilizados nas simulações, foram os volumes realmente verificados, que correspondiam a níveis de armazenamento elevados, uma vez que, no mês de fevereiro, houve a necessidade de amortecer uma cheia de grande porte.

Na revisão 0 do PMO-março/2007 ocorreu rompimento da restrição de defluência máxima em Jupuíá nas semanas 1 a 4 e em Itumbiara na semana 2. Na revisão 1 não houve rompimento de

restrição de defluência máxima, porém na última semana (semana 5) o resultado da operação indicou que nos pontos de controle de cheias a jusante de Jupuíá e Porto São José os volumes de espera das envoltórias dos conjuntos 1, 2 e 3 estavam sendo ocupados, resultando em estado de operação de controle de cheias diferente de zero (estado 3), indicando ainda não ser possível o relaxamento das restrições de volumes de espera. A revisão 2 apresentou rompimento de restrição de defluência máxima em Jupuíá nas semanas 2 e 3, indicando ainda não ser possível o relaxamento das restrições de volumes de espera. Na revisão 3 (última revisão do PMO-mar/2007) na última semana (quinta semana) o estado de operação foi zero, indicando que seria possível iniciar o relaxamento das restrições de volumes de espera a partir desta revisão. Entretanto, optou-se por iniciar os procedimentos para relaxamento a partir do PMO-abr/2007.

Na Tabela 3 são apresentados os volumes armazenados iniciais e finais da 1ª semana obtidos pelo modelo OPCHEN para o PMO-abril e suas revisões e a 1ª semana do PMO-maio, que correspondem às semanas 23 a 27 da estação chuvosa. Os estados de operação estão indicados em vermelho na coluna ao lado do volume de cada semana. Apesar do estado de operação ser diferente de zero (0), em alguns pontos de controle de cheia, nas quatro semanas de abril, em todas as execuções do modelo OPCHEN (PMO e revisões 1, 2 e 3 de abril) na última semana do horizonte considerado em cada revisão o estado de operação foi zero (0) em todos os pontos de controle da bacia. O que permitiu o relaxamento das restrições de volumes de espera. Como descrito no item 3.2, durante a execução do PMO e suas revisões os volumes armazenados obtidos para a primeira semana seriam informados ao modelo DECOMP como limites máximos de armazenamentos. Como neste estudo a iteração com o modelo DECOMP não foi realizada, considerou-se que o volume armazenado resultante da iteração com o modelo DECOMP seria exatamente o obtido pelo modelo OPCHEN. Portanto, a cada revisão foram considerados como volumes iniciais os volumes resultantes da execução do modelo OPCHEN na revisão anterior. Pode-se observar que na última semana da estação chuvosa (semana 27) quase todos os aproveitamentos encontram-se com seus reservatórios cheios. As exceções são Barra Bonita (94,63%) e Jurumirim (83,45%) e Xavantes (74,74%).

Na Figura 6 é apresentada a evolução dos armazenamentos, afluências, defluências totais e energéticas, e as envoltórias para os sistemas parciais SP176 (Jupuíá) e SP760 (P.S.José). Observa-se que, devido ao procedimento de relaxamento das restrições de volumes de espera, no sistema parcial SP176 em todas as semanas o armazenamento é superior ao nível de armazenamento da envoltória. No gráfico à direita da figura 6, pode-se observar que para o sistema parcial SP760 apenas nas semanas 23 e 24 o nível de armazenamento é superior ao nível da envoltória, nas semanas 25, 26 e 27 os armazenamentos são inferiores a envoltória devido a situação dos

reservatórios de Jurumirim e Xavantes que devido as afluições e defluências energéticas neste período não conseguiram encher seus reservatórios.

Tabela 3 – Armazenamentos iniciais e finais obtidos pelo programa OPCHEN com relaxamento das restrições de volumes de espera e afluições geradas pelo DIANA. PMO/Revisões de Abril.

	inicial	ABRIL					MAIO			
		23	24	25	26	27				
Furnas	97.87	97.35	0	100.00	0	99.27	0	100.00	0	99.98
MMoraes	91.97	86.92	0	99.30	0	100.00	0	100.00	0	100.00
Igarapava			0		0		0		0	
VGrande			0		3		0		0	
PColombia			0		3		0		0	
Marimbondo	84.55	91.07	0	100.00	3	100.00	0	100.00	0	100.00
AVermelha	99.13	100.00		100.00		99.67		100.00		100.00
Emborcacao	99.08	99.43	0	100.00	0	100.00	0	100.00	0	100.00
NPonte	100.00	99.67		100.00		100.00		100.00		100.00
Itumbiara	95.97	98.93	2	100.00	4	100.00	2	100.00	0	100.00
SSimao	102.03	100.00	2	100.00	5	100.00	2	100.00	0	100.00
BBonita	89.86	86.40		89.30		88.97		91.40		94.63
Promissao	98.26	99.03		99.60		99.43		100.00		100.00
ISolteira-Eq	96.54	99.37		100.00		100.00		100.00		100.00
Jupia			4		5		5		5	
Jurumirim	81.53	80.15	0	79.65	0	79.57	0	81.39	0	83.45
Xavantes	68.63	69.54	0	70.24	0	71.87	0	72.65	0	74.74
Capivara	97.70	99.89		100.00		100.00		100.00		100.00
P,S,Jose			4		5		5		5	
	vol inicial	OPC	OPC	OPC	OPC	OPC	OPC	OPC	OPC	OPC

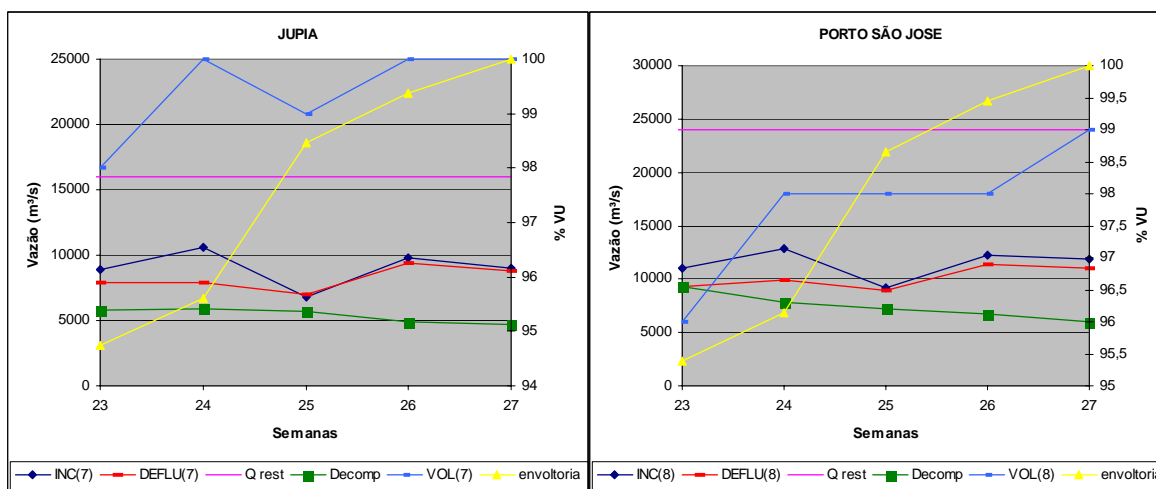


Figura 6 – Evolução dos armazenamentos (VOL), afluições (INC), defluências totais (DEFLU) e energéticas (Decomp), envoltórias dos sistemas parciais SP176 e SP760. Simulação OPCHEN/DIANA relaxando as restrições de volumes de espera.

4.6 – Análises comparativas

Na Figura 7 são apresentados os armazenamentos para as semanas de abril e a primeira semana de maio no sistema de aproveitamento da bacia do rio Paraná que consideram o controle de cheias, resultante de três simulações: (a) OPCHEN/DIANA com relaxamento, (b)

OPCHEN/PREVISÃO com relaxamento e (c) OPCHEN/PREVISÃO sem relaxamento. Pode-se observar que os armazenamentos quando não se procedeu o relaxamento das restrições de volumes de espera foram inferiores. Entretanto, nas três simulações na última semana o sistema não atingiu 100% de armazenamento. Nas simulações com relaxamento, não atingir 100% de armazenamento foi decorrência das baixas afluências no rio Paranapanema que não permitiu que os reservatórios de Jurumirim e Xavantes atingissem 100% de armazenamento.

No gráfico à esquerda da Figura 7, que apresenta a evolução dos armazenamentos nas três simulações para o sistema parcial SP176, que não engloba o rio Paranapanema, pode-se observar que nas duas simulações com relaxamento das restrições de volumes de espera, na última semana o SP176 atingiu 100% de armazenamento. Observa-se também que, enquanto nas simulações com relaxamento, partindo-se de um volume inicial (verificado) acima do volume da envoltória, as curvas de evolução dos armazenamentos mantiveram-se sempre acima da envoltória, a curva de armazenamentos da simulação sem relaxamento esvaziou o sistema parcial de forma a respeitar o volume requerido pela envoltória, mantendo-se sempre abaixo da envoltória, o que fez com que o sistema parcial não terminasse cheio.

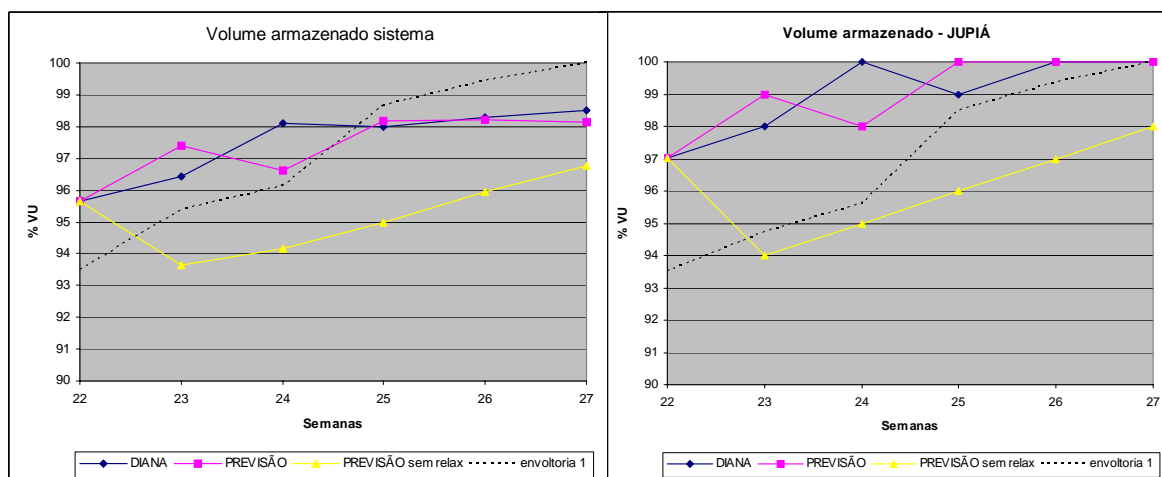


Figura 7 – Evolução dos armazenamentos e envoltória para os sistemas parciais SP176 (Jupiá) e do sistema todo nas simulações: OPCHEN/DIANA (DIANA) e OPCHEN/PREVISÃO (PREVISÃO) com relaxando e OPCHEN/PREVISÃO sem relaxamento das restrições de volumes de espera (PREVISÃO sem relax).

Na Figura 8 é apresentada a evolução dos armazenamentos nos aproveitamentos Marimbondo, Água Vermelha e São Simão, obtidos pelas três simulações. Pode-se observar que, enquanto Marimbondo atingiu 100% de armazenamento nas três simulações, Água vermelha e São Simão atingiram 100% de armazenamento apenas nas simulações com relaxamento. Na simulação em que a restrição de volume de espera foi mantida, o armazenamento final de Água Vermelha atingiu apenas 82% e o armazenamento de São Simão atingiu 95%.

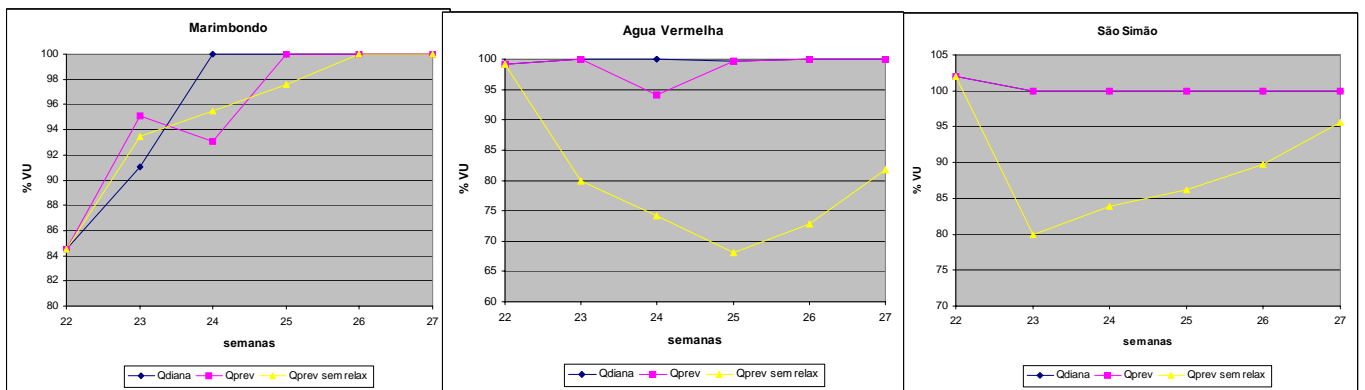


Figura 8 – Evolução dos armazenamentos dos aproveitamentos Marimbondo, Água Vermelha e São Simão, nas simulações: OPCHEN/DIANA (Qdiana) e OPCHEN/PREVISÃO com relaxando (Qprev) e OPCHEN/PREVISÃO sem relaxamento (Qprev sem relax) das restrições de volumes de espera.

5 – CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada uma metodologia para auxiliar a tomada de decisão de relaxamento das restrições de volumes de espera ao final da estação chuvosa. As ferramentas utilizadas foram os programas CAEV versão 3.8, OPCHEN versão 3.1.4 e DIANA versão 5.03.

A metodologia apresentada foi testada na bacia do rio Paraná, na estação chuvosa novembro/2006 a abril/2007. Os testes mostraram que a metodologia proposta é coerente e as ferramentas estão adequadas para a realização das simulações necessárias. Com a aplicação desta metodologia é esperado um ganho na recuperação dos armazenamentos ao final da estação chuvosa. Este ganho, no entanto, será variável em função das condições hidrometeorológicas de cada ano.

BIBLIOGRAFIA

- CEPEL (2002). “*Modelo DECOMP – Manual de Referência Versão 11.0*”. Relatório Técnico DPD/PEN – 15053/03.
- CEPEL (2010). “*Operação Semanal de Controle de Cheias em Situação Normal – OPCHEN 3.1.3 - Manual de Metodologia*”. Relatório Técnico DP/DEA – 3051/08.
- CEPEL (2011). “*Uso dos Programas OPCHEN e DIANA para auxiliar a Tomada de Decisão de Relaxamento das Restrições de Volume de Espera*”. Relatório Técnico DP/DEA – 3933/11.
- 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.

COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., ROCHA, V.F. (2001). “*Planejamento da Operação Semanal de Controle de Cheias em Sistemas Hidroelétricos – Modelos OPCHEN e OPCHENS*”, XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, SE.

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.

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, N°4, Pp. 1135-1144.

KELMAN, J., DAMÁZIO, J.M., COSTA, J.P. (1983). “*Geração de Séries Sintéticas de Vazões Diárias – Modelo Diana*”, Revista Brasileira de Engenharia, Vol.1, N° 2, Pp. 5-22.

ONS (2006). “*Plano Anual de Prevenção de Cheias (Ciclo 2006-2007)*”, Rio de Janeiro, RJ.

PIMENTEL, A.L.G; XAVIER, L.N.R.; COSTA, F.S.; DINIZ, A.L.S.L. et al. (2005). “*Usos Múltiplos da Água no Planejamento Energético da Operação a Curto Prazo: metodologia e resultados*”, XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, PB.