



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

GOP 23
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IX

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GOP

ANTECIPAÇÃO DO REENCHIMENTO DOS VOLUMES DE ESPERA NOS RESERVATÓRIOS DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL - SIN

Fernanda da Serra Costa^{*(1),(2)}

Igor Pinheiro Raupp⁽¹⁾

Jorge Machado Damázio^{(1),(2)}

⁽¹⁾CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

⁽²⁾UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

RESUMO

Este artigo apresenta uma proposta metodológica para minimizar o conflito existente entre a utilização dos reservatórios do SIN para geração de energia elétrica e para controle de cheias, onde o primeiro uso tenta manter os reservatórios o mais cheio possível e o segundo o mais vazio possível. A metodologia proposta compreende antecipar o reenchimento dos reservatórios, a partir da situação hidrológica dos meses que antecedem o fim do período chuvoso, preservando-se o risco definido no Estudo de Prevenção de Cheias. Esta metodologia é testada na bacia do rio Paraná.

PALAVRAS-CHAVE: Controle de cheias; operação de reservatórios; planejamento da operação

1.0 INTRODUÇÃO

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. No Sistema Interligado Nacional - SIN, a cada ano, antes do início da estação chuvosa, são calculados os volumes de espera a serem alocados no seu sistema de reservatórios. Estes cálculos fazem parte dos Estudos de Prevenção de Cheias, desenvolvidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Como o uso dos volumes dos reservatórios para geração de energia elétrica e para o controle de cheias são conflitantes, é necessário que o cálculo dos volumes de espera seja feito de forma criteriosa e otimizada para minimizar esse conflito. Um dos critérios utilizados é alocar volumes de espera apenas na estação chuvosa e nos casos das bacias localizadas em regiões em que as aflúências apresentam sazonalidade, a alocação do volume de espera é feita através de uma curva sazonal de espaços vazios, sendo que o volume de espera necessário no final da estação chuvosa deve ser nulo.

Como não é possível saber que aflúências ocorrerão durante a estação chuvosa, o cálculo de volumes de espera é um problema estocástico, e a metodologia atualmente em uso considera a incerteza hidrológica através do uso de conjuntos de séries sintéticas de aflúências diárias ao sistema e adota as condições de controlabilidade (1), 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 da solução de um problema linear estocástico com função objetivo refletindo interesses da geração de energia elétrica (2).

Entretanto, durante a estação chuvosa, muitas vezes observam-se aflúências mensais baixas (por exemplo abaixo da MLT do mês). Quando esses meses estão após a primeira metade da estação chuvosa, surge a dúvida se a seqüência de aflúências que estaria ocorrendo, nesta estação chuvosa, seria uma daquelas que não necessitariam do volume de espera correspondente à envoltória, e portanto se não seria possível, e desejável, antecipar o reenchimento do volume de espera, de forma a aumentar a garantia de atingir o final da estação

(*) Av. Horácio Macedo, 354 – Cidade Universitária – CEP 21941-911 - Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6411 – Fax: (+55 21) 2598-6482 – E-mail: fernanda@cepel.br

chuvosa com os reservatórios plenamente cheios, garantido assim, maior segurança para enfrentar a estação seca, sem contudo alterar a proteção (tempo de retorno) fornecida ao vale a jusante. Esse artigo apresenta os resultados do estudo para verificar a viabilidade de antecipação da recuperação dos volumes de espera na bacia do rio Paraná com preservação da proteção fornecida ao vale a jusante.

2.0 A QUESTÃO DA ANTECIPAÇÃO DA RECUPERAÇÃO DOS VOLUMES DE ESPERA

Imaginemos, por simplificação, a situação de um único reservatório, cuja envoltória de volumes de espera é a apresentada na Figura 1, localizado em uma bacia em que a estação chuvosa compreenda o período entre 1º de novembro e 30 de Abril. Suponhamos que as aflúncias relativas aos meses já transcorridos da estação chuvosa apresentem valores abaixo da MLT dos respectivos meses. Sendo assim, pergunta-se: *Seria possível, por exemplo, no início do penúltimo mês da estação chuvosa (Março) antecipar o reenchimento dos volumes de espera, substituindo a envoltória representada pela curva contínua, pela envoltória representada pela curva tracejada da Figura 1, sem contudo alterar o risco de ocorrência de cheias adotado no Estudo de Prevenção de Cheias, quando essa informação não era disponível?*

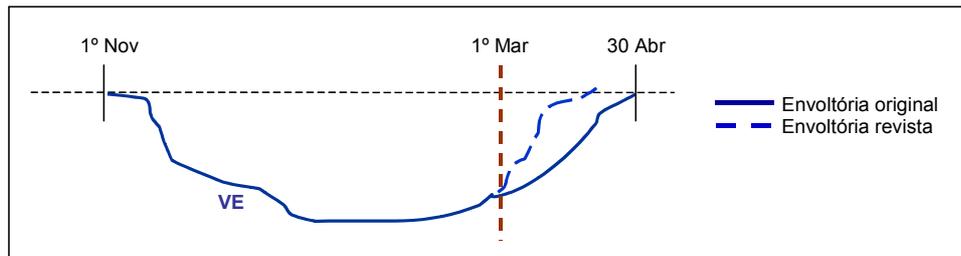


Figura 1: Envoltória para um reservatório localizado em uma região cuja estação chuvosa inicia em 1º de novembro e termina em 30 de Abril.

Para responder esta pergunta, primeiramente é necessário verificar se as informações sobre a hidrologia (aflúncias) dos meses que antecedem o fim da estação chuvosa, permitem antever o comportamento das cheias nos meses finais da estação chuvosa. Caso isso se verifique, é necessário ainda, definir a melhor forma de incorporar esta informação aos procedimentos e metodologias de controle de cheias, preservando-se os riscos (Tempo de Retorno) fixados nos Estudos de prevenção de Cheias.

3.0 VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE ANTEVER O COMPORTAMENTO DAS CHEIAS NO FINAL DA ESTAÇÃO CHUVOSA NA BACIA DO PARANÁ

Na bacia do rio Paraná a estação chuvosa compreende o período de 1º de novembro a 30 de Abril. Normalmente, a preocupação com a recuperação dos volumes de espera surge no início de Março, quando as aflúncias dos meses anteriores apresentaram-se abaixo da média de longo termo. Assim, supondo que se deseje verificar se é possível antecipar a recuperação dos volumes de espera a partir de 1º de Março, seria natural considerar as aflúncias mensais dos meses compreendidos entre Novembro e Fevereiro como a informação hidrológica que poderia antecipar informações sobre o comportamento das cheias nos meses de Março e Abril. Nesse estudo representou-se:

- A informação hidrológica dos meses que antecedem o fim da estação chuvosa através da média das vazões mensais de diferentes conjuntos de meses compreendidos entre Novembro e Fevereiro: Novembro-Fevereiro, Dezembro-Fevereiro, Janeiro-Fevereiro e Fevereiro, e
- As cheias nos meses finais da estação chuvosa (Março e Abril) através das vazões máximas de diferentes durações (1 dia, 7 dias, ...) e também pelo próprio volume de espera necessário.

Por simplificação, considerou-se o sistema de reservatórios da bacia do rio Paraná até o aproveitamento hidroelétrico de Jupirá como um único reservatório, e a aflúncia como a vazão natural total até este aproveitamento. Como restrição de controle de cheias considerou-se o limite máximo de defluência a jusante de Jupirá de 16000 m³/s. A partir da série histórica de aflúncias mensais a Jupirá (vazão natural total) foram calculadas as séries das médias das vazões mensais dos períodos: Novembro-Fevereiro, Dezembro-Fevereiro, Janeiro-Fevereiro e Fevereiro. Com a série histórica de aflúncias diárias foram calculadas as vazões máximas de duração de 1 dia, 7 dias e 15 dias, para o período compreendido entre 1º de Março a 30 de Abril.

3.1 Seleção dos meses que melhor representam o comportamento hidrológico do período anterior ao final da estação chuvosa

Para identificar qual a combinação de médias das vazões mensais dos diferentes conjuntos apresenta maior influência no comportamento das cheias no período de Março a Abril, calculou-se a matriz de correlações entre as médias das vazões mensais e as vazões máximas de diferentes durações, Tabela 1. Pode-se observar na Tabela 1 que as médias das vazões mensais de Jan-Fev e Fev são as que apresentam as maiores correlações com as vazões máximas das três durações (1 dia, 7 dias e 15 dias). Sendo assim, foram selecionadas estas duas

variáveis para representar o comportamento hidrológico dos meses que antecedem o período final da estação chuvosa.

Tabela 1: Matriz de correlação

Média das vazões mensais	Vazão Máxima em Mar-Abr		
	1 dia	7 dias	15 dias
Nov-Fev	0,49	0,49	0,52
Dez-Fev	0,51	0,51	0,54
Jan-Fev	0,58	0,58	0,61
Fev	0,60	0,58	0,59

3.2 Classificação da hidrologia do período que antecede o final da estação chuvosa

Selecionado os conjuntos de meses cuja média das vazões mensais melhor representa a relação entre a hidrologia dos meses que antecedem o fim da estação chuvosa com a ocorrência de vazões máximas nos meses finais da estação, torna-se necessário definir critérios e procedimentos para classificar esta hidrologia. Foram adotados os seguintes critérios:

- O procedimento para classificação deveria estar relacionado com o comportamento das cheias nos meses de Março e Abril (ex: vazões máximas e volumes de espera),
- A parcimônia, o que implica que a decisão por aumentar o número de classes só se justifica se este aumento conduzir a um aumento significativo na explicação do comportamento das cheias nos meses de Março e Abril,
- Número de anos do histórico em cada classe ser suficiente para estimação dos parâmetros do modelo de geração de séries sintéticas de vazões diárias.

3.2.1 Metodologia Adotada : Árvore de Regressão

Os modelos baseados em Árvore de Classificação e Regressão são técnicas de análise exploratória de dados úteis quando a estrutura dos dados é desconhecida (oculta) e quando a quantidade de informação é grande. A árvore de classificação/regressão particiona um espaço \mathcal{X} de observações em subconjuntos cujos elementos pertencem a uma dada classe. A estrutura de uma árvore é formada por um nó inicial, denominado "raiz" (*root*), cada um dos demais pontos de decisão é denominado simplesmente "nó" (*nodes*) e os nós terminais são denominados "folhas" (*leaf*). Cada "nó" está associado a um critério de decisão para divisão dos subconjuntos. O número "folhas" resultantes corresponde ao número de classes em que o espaço \mathcal{X} foi dividido. A Figura 2 apresenta um exemplo de árvore de classificação/regressão em que o espaço \mathcal{X} foi dividido em cinco classes.

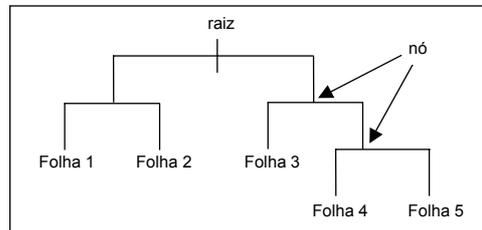


Figura 2: Exemplo de Árvore com cinco classes

O crescimento da Árvore baseia-se em algoritmo binário de particionamento que em cada nó divide os dados em classes, tendo como critério uma ou mais variáveis explicativas, até que todas as classes sejam homogêneas em termos da variável resposta ou que o número de elementos em cada nó seja igual a um limite mínimo. Uma classe é homogênea quando todos os valores da variável resposta de seus elementos são iguais. Por exemplo, suponhamos que a variável explicativa seja a vazão mensal de Fevereiro e que a variável resposta seja a vazão diária máxima em Março-Abril. Se não existirem anos com valores de vazões mensais de Fevereiro iguais e a cada vazão de Fevereiro estiver associado uma vazão máxima diária em Março-Abril diferente, então para que todas as classes sejam homogêneas é necessário que existam tantas classes quanto o número de anos do histórico de aflúncias. Porém, para atender ao número mínimo de elementos por classe, o particionamento deve considerar faixas de valores de vazão de Fevereiro, o que leva a classes com vazões máximas diárias diferentes (não homogênea), surgindo a necessidade de um critério para construção da Árvore que não seja a homogeneidade. Neste sentido, adota-se o critério de minimização da soma dos desvios residuais, que pode ser calculado de forma diferente dependendo se a Árvore é de regressão (quando a variável explicativa e a variável de resposta são numéricas) ou classificação (quando a variável resposta não é numérica). No caso da Árvore de regressão, o critério é a minimização da soma dos quadrados dos resíduos (variância residual), D , e cada divisão é feita de modo a maximizar a redução de D .

$$D = \sum_j \sum_i (y_{j,i} - \mu_{[j]})^2 \quad (1)$$

onde $\mu_{[j]}$ é a média da variável resposta dos elementos da classe j .

A complexidade de uma Árvore é descrita pelo número de nós (tamanho da Árvore). Uma Árvore pode se tornar mais complexa que o necessário para descrever os dados. Uma forma de balancear a complexidade da Árvore e sua capacidade de ajuste (descrever) aos dados é através da poda sucessiva dos galhos menos importantes. O algoritmo de poda tem como critério uma função similar á variância residual, equação 2. O algoritmo de poda obtém a sub-árvore que minimiza $D_k(T')$ entre todas as sub-árvores. Quanto maior K , menor o número de nós.

$$D_k(T') = D(T') + K \cdot \text{size}(T') \quad (2)$$

onde: $D_k(T')$ é a variância residual corrigida da sub-árvore T' ; $\text{size}(T')$ é o número de nós terminais de T' ; K é o parâmetro custo-complexidade (perda de parcimônia).

Nesta investigação utilizou-se o software estatístico S-Plus2000, que possui as funções *Tree* e *Prune.tree*. Foram criadas três funções específicas para a obtenção dos resultados apresentados nos próximos itens. Maiores detalhes sobre Árvore de Classificação e Regressão ver (3, 4 e 5).

3.2.2 Vazão Média de Fevereiro

Considerando a metodologia descrita no item 3.2.1 construiu-se a árvore apresentada na Figura 3, que agrupa as vazões máximas de duração 1 dia no período de Março-Abril, em função das vazões mensais de Fevereiro.

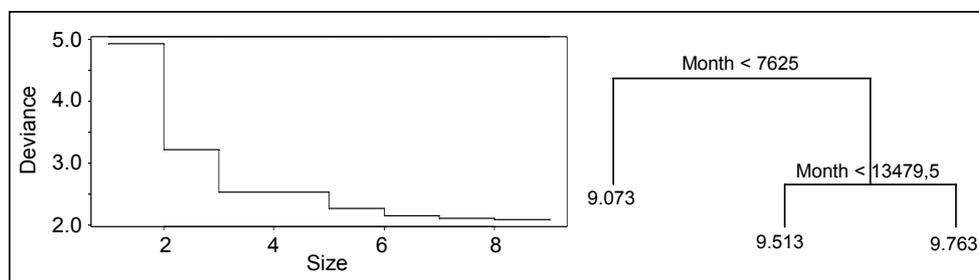


Figura 3: Modelo de árvore para agrupamento das vazões máximas de duração 1 dia em função das vazões mensais de Fevereiro.

Na parte esquerda da Figura 3 pode-se observar que quando se divide o conjunto de vazões máximas em duas classes, em função das vazões mensais de Fevereiro, reduz-se a variância residual em 35% (5 para 3,25) e quando se divide em três classes, reduz-se a variância residual em 50% (5 para 2,5). O aumento para quatro classes não altera a redução da variância residual obtida com três classes. Seguindo os critérios definidos no item 3.2 escolheu-se, a princípio, classificar as vazões mensais de Fevereiro em Alta, Média e Baixa. Os limites para esta classificação obtidos através do modelo de árvore de agrupamento foram:

- Alta: vazão mensal de Fevereiro superior a 13479,5 m³/s
- Média: vazão mensal de Fevereiro entre 7625,0 m³/s e 13479,5 m³/s
- Baixa: vazão mensal de Fevereiro inferior a 7625,0 m³/s

A Tabela 2 apresenta a média das vazões máximas de 1 dia no período de Março-Abril correspondente a cada classe. A Tabela 2 também apresenta o número de ocorrência de vazões máximas superiores a restrição a jusante de Jupiá (16000 m³/s) em Março-Abril. Pode-se observar a diferença na frequência de ocorrência de vazões superiores a 16000 m³/s nas três classes. A Figura 4(a) apresenta o gráfico das vazões máximas de 1 dia em Março-Abril versus a vazão média mensal de Fevereiro. Enquanto que a Figura 4(b) apresenta a distribuição acumulada de probabilidades das vazões máximas condicionadas à classe da vazão mensal de Fevereiro. Observa-se a grande diferença entre elas.

Tabela 2: Limites superiores das vazões mensais de Fevereiro observados no histórico para cada classe e frequência de ocorrência de vazões máximas superiores a 16000 m³/s em Março-Abril.

Classe	Limite superior p/ vazão de Fevereiro (m ³ /s)	Média das vazões máximas de 1 dia em mar-abr (m ³ /s)	Vazão diária Mar-Abr superior a restrição		Total
			Sim	Não	
Alta	∞	17379	10	7	17
Média	13315	13534	6	25	31
Baixa	7568	8717	0	7	7

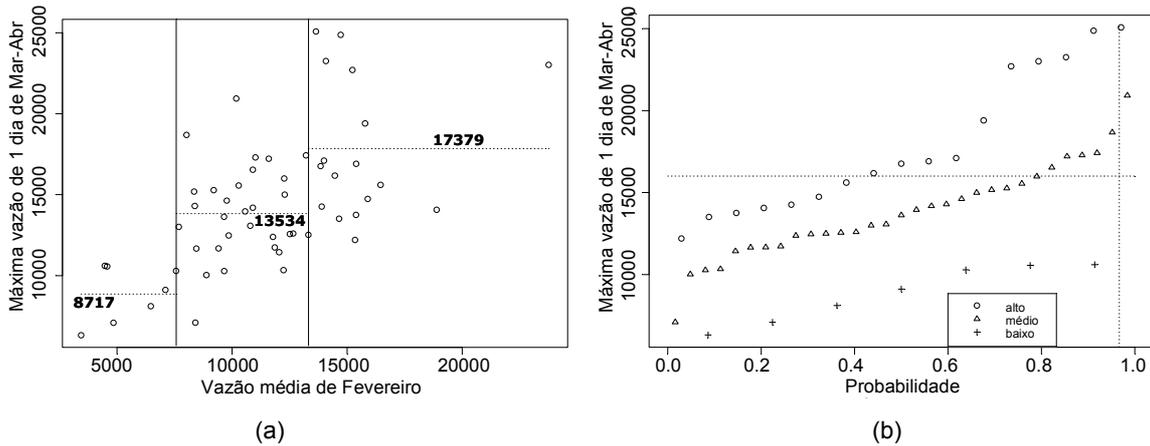


Figura 4: (a) Dispersão das vazões máximas de 1 dia em Março-Abril versus a vazão média mensal de Fevereiro e (b) distribuições acumuladas de probabilidades das vazões máximas de 1 dia em Março-Abril condicionadas as classes das vazões mensais de Fevereiro.

3.2.3 Vazão Média de Janeiro-Fevereiro (Jan-Fev)

Com o objetivo de verificar se a utilização da média das vazões mensais dos meses de Jan-Fev resultaria em uma melhor classificação, a análise apresentada no item 3.2.1 foi refeita, substituindo a vazão mensal de Fevereiro pela média das vazões mensais de Jan-Fev. A Figura 5 apresenta a árvore resultante do agrupamento das vazões máximas de duração 1 dia no período de Março-Abril, em função das médias das vazões mensais de Jan-Fev. A melhor classificação, considerando os critérios definidos no item 3.2, foi considerar três categorias para a vazão média de Jan-Fev, cujos valores limites estão na Tabela 3. A Tabela 3 também apresenta o número de ocorrência de vazões diárias máximas superiores a restrição a jusante de Jupia (16000 m³/s) em Março-Abril. Pode-se observar a diferença na frequência de ocorrência de vazões superiores a 16000 m³/s nas três classes.

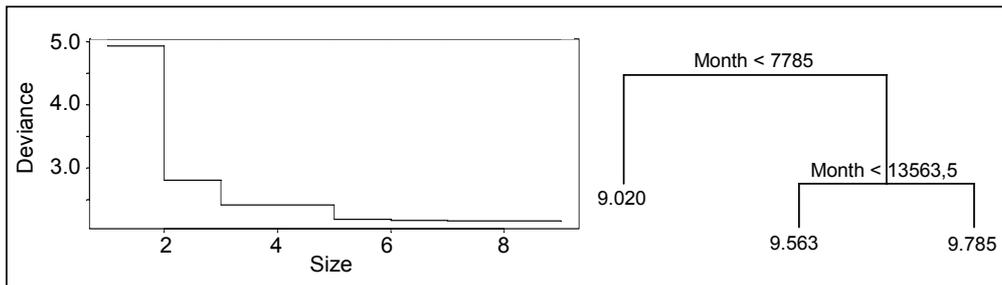


Figura 5: Modelo de árvore para agrupamento das vazões máximas diárias em função das médias das vazões mensais de Jan-Fev.

Tabela 3: Limites superiores das médias das vazões mensais de Jan-Fev observados no histórico para cada classe e frequência de ocorrência de vazões diárias máximas superiores a 16000 m³/s em Março-Abril

Classe	Limite superior p/ vazão de Jan-Fev (m³/s)	Média das vazões máximas de 1 dia em Mar-Abr (m³/s)	Vazão diária Mar-Abr superior a restrição		Total
			Sim	Não	
Alta	∞	17765	5	5	10
Média	13533	14228	11	27	38
Baixa	7377	8267	0	7	7

Comparando-se a frequência de ocorrência de vazões diárias máximas superiores a 16000 m³/s apresentadas nas Tabelas 2 e 3, observa-se que:

- A diferença entre as frequências de ocorrência de vazões superiores a 16000 m³/s nas três classes é maior quando a classificação considera a vazão mensal de Fevereiro (Tabela 2), e
- A distribuição do número de observações em cada classe é mais uniforme quando considera a vazão mensal de Fevereiro (Tabela 2).

Pelos motivos acima apresentados decidiu-se considerar como variável indicativa do comportamento da necessidade de volumes de espera no período de Março a Abril a vazão média de Fevereiro de acordo com a sua classificação em Alta (vazão superior a 13315 m³/s), Média (vazão entre 13315 m³/s e 7568 m³/s) e Baixa (vazão inferior a 7568 m³/s).

As Figuras 6(a) e 6(b) apresentam, o gráfico dos volumes de espera máximos anuais no período Março a Abril versus a vazão mensal de Fevereiro, e as distribuições acumuladas de probabilidades destes volumes de espera, considerando a classificação definida no item 3.2.2 (Tabela 2). Pode-se observar que só ocorre necessidade de volumes de espera nas classes Média e Alta e que as distribuições são bastante distintas. As linhas horizontais na Figura 6 representam a média dos volumes de espera máximos anuais em Março-Abril.

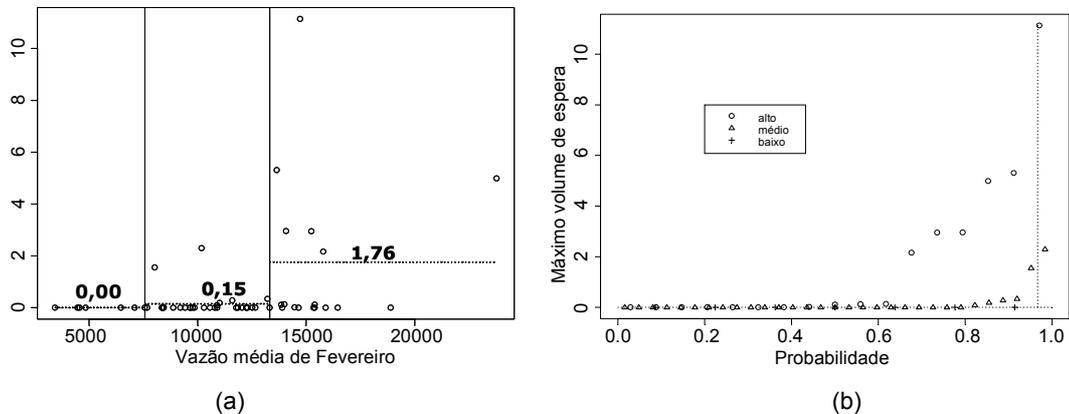


Figura 6: (a) Volumes de espera máximos anuais em Março-Abril versus vazões mensais de Fevereiro e (b) distribuições acumuladas de probabilidades dos volumes de espera máximos anuais em Março-Abril para as três classes de vazões mensais de Fevereiro (Alta, Média e Baixa).

Foram também realizados estudos classificando em apenas duas categorias (Alta e Baixa) as médias das vazões mensais de Fevereiro e de Jan-Fev. Porém como foi observada frequência de valores de vazões máximas em Mar-Abr superiores a 16000 m³/s diferentes nas categorias Baixa e Média (Tabelas 2 e 3), e a consideração de três classes diminui a variância residual, não se julgou conveniente juntar as duas categorias, optando-se por manter as três classes.

4.0 METODOLOGIA PARA INCORPORAÇÃO DESTA INFORMAÇÃO NO CÁLCULO DAS ENVOLTÓRIAS

Suponhamos uma bacia cuja estação chuvosa compreenda o período de 1º de Novembro a 30 de Abril e que se deseje rever a envoltória de volumes de espera em 1º de Março, tendo como critério a classificação da vazão mensal verificada em Fevereiro, preservando-se o risco de cheia fixado no início dos estudos. Para tal, é necessário dispor de uma envoltória para o período de 1º de Novembro a 28 de Fevereiro, e três envoltórias para o período de 1º de Março a 30 de Abril, cada uma correspondente a uma das classes de vazão mensal de Fevereiro (Alta, Média e Baixa). A Figura 7 exemplifica esta situação. Ressalta-se que a revisão dos volumes de espera em 1º de Março, não indica que necessariamente todos os anos ocorrerão redução desses volumes. Nos anos em que a vazão mensal observada no mês de Fevereiro for classificada como Alta, esta revisão indicará a necessidade de volumes de espera no período de Março-Abril maiores do que aquele calculado quando não se dispunha desta informação.

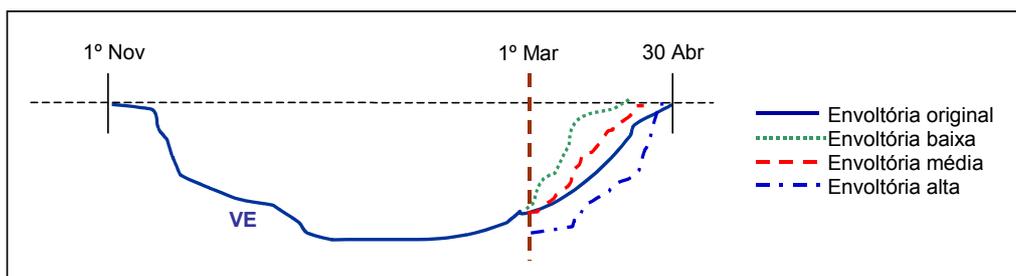


Figura 7: Exemplo de conjunto de envoltórias necessário para permitir a revisão dos volumes de espera em 1º de Março.

Suponhamos disponível uma série histórica de aflúncias diárias composta de NH períodos chuvosos. O procedimento para o cálculo deste conjunto de envoltória pode ser descrito nos seguintes passos:

- a. Gerar N séries sintéticas de vazões diárias condicionadas as três classes de vazões mensais de Fevereiro.
 - Dividir os NH períodos chuvosos do histórico de vazões diárias em três subconjuntos: períodos chuvosos cuja vazão mensal de Fevereiro é Baixa, NH_B, períodos chuvosos cuja vazão mensal de Fevereiro é Média, NH_M, e períodos chuvosos cuja vazão mensal de Fevereiro é Alta, NH_A,
 - Estimar três conjuntos de parâmetros do modelo de geração de séries sintéticas, um para cada subconjunto de séries históricas,
 - Gerar N_A, N_M e N_B séries sintéticas a partir de cada conjunto de parâmetros, onde:

$$N_A = N \times NH_A / NH \quad N_M = N \times NH_M / NH \quad N_B = N \times NH_B / NH \quad N_A + N_M + N_B = N$$

- N_A , N_M e N_B são o número de séries sintéticas geradas com os parâmetros estimados a partir das NH_A , NH_M e NH_B séries históricas respectivamente. Estes conjuntos de séries sintéticas serão classificados como Altas, Média e Baixas respectivamente.
- Definir o Tempo de Retorno, TR,
 - Selecionar por algum critério (hoje os critérios disponíveis são: Máxima Flecha ou Máximo Reenchimento) as $\bar{N} = N / TR$ séries que não serão protegidas,
 - Calcular as trajetórias críticas das N séries sintéticas para o período de 1º de Novembro a 30 de Abril,
 - Calcular a envoltória das $N - \bar{N}$ trajetórias críticas,
 - Determinar quantas das \bar{N} séries sintéticas não são protegidas no período de 1º de Março a 30 de Abril, \bar{N}_{M-A} . Assim, o risco no período Março-Abril é \bar{N}_{M-A} / N .
 - Determinar quantas e quais das \bar{N}_{M-A} séries não protegidas no período Março-Abril são da classe Alta, \bar{N}_{M-A}^A , Média, \bar{N}_{M-A}^M e Baixa, \bar{N}_{M-A}^B .
 - Calcular as envoltórias no período Março-Abril para cada um dos três conjuntos de séries sintéticas N_A , N_M e N_B , não protegendo respectivamente as \bar{N}_{M-A}^A , \bar{N}_{M-A}^M e \bar{N}_{M-A}^B séries sintéticas identificadas no item g.

5.0 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA NA BACIA DO RIO PARANÁ

A metodologia proposta no item 4 foi aplicada na bacia do rio Paraná. Utilizou-se o mesmo histórico de vazões diárias do estudo apresentado no item 3, formado por 55 estações chuvosas (que por simplificação serão chamadas de anos) compreendendo o período de 1º de Novembro a 30 de Abril. Pela classificação definida no item 3 os 55 anos do histórico foram divididos como apresentado na Tabela 4. Seguindo o procedimento do passo 1 (item 4) os números de séries sintéticas que devem ser geradas a partir dos três conjuntos de parâmetros estão na terceira coluna da Tabela 4.

O tempo de retorno adotado foi 30 anos, portanto para $N = 12000$ o número de séries que não deverão ser protegidas é $\bar{N} = 400$. A envoltória resultante considerando o critério de máximo reenchimento e o tempo de retorno de 30 anos é a apresentada a esquerda na Figura 8(a). Do conjunto de 400 séries sintéticas não protegidas, 229 não estão protegidas no período de Março a Abril ($\bar{N}_{M-A} = 229$). A quarta coluna da Tabela 4 apresenta quantas destas 229 séries são da classe Alta, Média e Baixa. As envoltórias para o período Março-Abril de cada classe foram calculadas mantendo-se seus tempos de retorno originais nesse período, apresentados na quinta coluna da Tabela 4, Figura 8(b). Observa-se o aumento da necessidade de volume de espera quando a vazão mensal de Fevereiro é classificada como Alta. Na semana 23, que apresenta a maior necessidade de volume de espera (24% da capacidade do sistema), há um aumento para 30%. Quando a vazão mensal de Fevereiro é classificada como Baixa a maior necessidade de volume de espera é de 8% da capacidade do sistema na semana 23. A ocorrência de vazão mensal de Fevereiro classificada como Média altera pouco a envoltória obtida no planejamento, apenas antecipando em 1 semana a recuperação dos volumes de espera, além de nas semanas 21, 22 e 23 necessitar de volumes de espera menores em relação à envoltória do planejamento.

Tabela 4: Número de séries classificadas como Alta, Média e Baixa, no conjunto de séries históricas de acordo com a classificação do item 3, número esperado no conjunto de séries sintéticas e número de séries sintéticas não protegidas no período de Março a Abril em cada classe.

Classificação	Série Histórica	Série Sintética	Nº de séries não protegidas em Mar-Abr	Tempo de Retorno em Mar-Abr (anos)
Baixa	$NH_B = 7$ (12,7%)	$N_B = 1527$	$\bar{N}_{M-A}^B = 0$	∞
Média	$NH_M = 31$ (56,4%)	$N_M = 6763$	$\bar{N}_{M-A}^M = 4$	3000
Alta	$NH_A = 17$ (30,9%)	$N_A = 3710$	$\bar{N}_{M-A}^A = 225$	53,3
Total	$NH = 55$	$N = 12000$	229	52

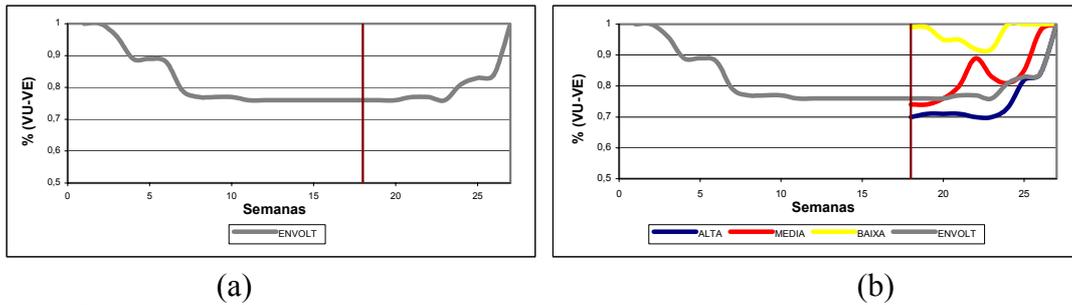


Figura 8: (a) Envolvória para o período de Novembro a Abril para um tempo de retorno de 30 anos e (b) Adiciona-se a esta envoltória as envoltórias para o período Março-Abril para cada classe, considerando os tempos de retorno da Tabela 4. Valores semanais.

6.0 CONCLUSÕES

No caso da bacia do rio Paraná a investigação da viabilidade de antecipação da recuperação dos volumes de espera identificou que a informação mais relevante para indicar o comportamento das cheias nos meses de Março-Abril é a vazão mensal de Fevereiro. Adotando-se a metodologia de árvore de regressão e o histórico de 55 anos (períodos chuvosos), a vazão mensal de Fevereiro foi classificada em Alta (superior a $13315 \text{ m}^3/\text{s}$), Média (entre $7568 \text{ m}^3/\text{s}$ e $13315 \text{ m}^3/\text{s}$) e Baixa (inferior a $7568 \text{ m}^3/\text{s}$). Nenhum dos 7 períodos chuvosos em que a vazão mensal de Fevereiro foi considerada como Baixa, houve necessidade de volume de espera nos meses de Março e Abril. Nos 31 períodos chuvosos em que a vazão mensal de Fevereiro foi considerada Média, apenas 6 necessitaram de volumes de espera em Março e Abril. Já nos 17 períodos chuvosos em que a vazão mensal de Fevereiro foi considerada Alta, 10 períodos necessitaram volumes de espera em Março e Abril.

A metodologia proposta para alteração da envoltória de volumes de espera nos meses de Março-Abril considera que o conjunto de 12000 séries sintéticas seja obtido através da geração condicionada de três conjuntos, cada qual condicionado a uma das classificações da vazão mensal de Fevereiro e com um número de séries proporcional ao número de séries de cada classe verificado no histórico de vazões. Em relação à envoltória do planejamento calculada quando não se considera a classe da vazão mensal de Fevereiro, as envoltórias obtidas para o período Março-Abril para cada classe sinalizaram:

- Aumento da necessidade de volume de espera quando a vazão mensal de Fevereiro é classificada como Alta,
- Diminuição da necessidade de volume de espera se a vazão mensal de Fevereiro é classificada como Baixa,
- Pouca alteração na necessidade de volume de espera se a vazão mensal de Fevereiro é classificada como Média. Nesse caso houve uma antecipação da recuperação do volume de espera em 1 semana.

Alguns pontos que ainda podem ser mais investigados:

- Risco em Março-Abril em cada classe: na investigação apresentada as envoltórias de cada classe no período Março-Abril mantiveram os riscos de cada classe originais do planejamento neste período, ou seja proteção decrescentes da classe Baixa para a Alta. Uma outra opção seria redistribuir o risco, igualando-se os riscos das três classes ao risco do período. Esta opção levaria a envoltórias com maior exigência de volumes de espera para a classe Alta. A curva do planejamento teria que ser recalculada considerando as séries protegidas no período Março-Abril; devendo exigir mais volumes de espera. A vantagem desta alternativa é a possibilidade de menor alocação de volumes de espera em Março-Abril para as classes Média e Baixa.
- Estudo para recuperação em Abril: a investigação concentrou-se na proposta de antecipar a recuperação dos volumes de espera a partir de Março.
- Outras bacias: a investigação se concentrou na bacia do rio Paraná. Ressalta-se que as conclusões são para esta bacia e que não podem ser generalizadas.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) DAMÁZIO, J. M., MARIEN, I., COSTA, F.S. (1994), "Building Flood Control Rule Curves for Multipurpose Multireservoir System Using Controllability Condition" (1994), Water Resources Research, Vol30, n04, pp1135, 1144, April, 1994.
- (2) COSTA, F.S, DAMÁZIO, J. M., NEVES, F. P., GHIRARD, A. O., ROCHA, V. F., 1999, "Sistema Spec – Sistema para Estudos de Prevenção de Cheias em Sistemas Hidroelétricos", XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, MG.
- (3) RIPLEY. B.D., Pattern Recognition and Neural Networks, Cambridge University Press, 1996.
- (4) BRAUN, J., MAINDONALD, J., Data Analysis and Graphics Using R, Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics, Cambridge Press, 2003.
- (5) MATHSOFT, S-Plus 2000, Guide to Statistics Volume I , Data Analysis Products Division, MathSoft, Seattle, WA, 1999.