

## Minimização do Conflito Entre a Geração de Energia Elétrica e o Controle de Cheias no Planejamento da Operação de Reservatórios II: Aplicação

Igor Pinheiro Raupp, Fernanda da Serra Costa e Jorge Machado Damázio

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ  
raupp@cepel.br, fernanda@cepel.br, damazio@cepel.br

Recebido: 24/11/08 - revisado: 20/08/09 - aceito: 03/05/10

---

### RESUMO

O primeiro artigo desta série de dois apresentou três propostas de alteração na definição dos volumes de espera para reservatórios utilizados para controle de cheias, com o intuito de minimizar o conflito entre a geração de energia elétrica e o controle de cheias. Foram elas: i) Desconsideração dos volumes alocados na recessão das trajetórias críticas; ii) Consideração da previsão de vazão no cálculo das trajetórias crítica; e iii) Alteração dos volumes de espera no final da estação chuvosa de acordo com a vazão média mensal observada no início da estação. No presente artigo, estas propostas foram aplicadas à bacia do rio Paraná, para verificar sua aplicabilidade e eficácia. Por simplificação, considerou-se a bacia do Paraná até a usina hidrelétrica de Jupia como um reservatório equivalente, e com um único ponto de controle a jusante da referida usina. Os resultados são muito promissores, o que nos leva a concluir que estas metodologias se apresentam como possíveis aprimoramentos a serem utilizados na metodologia atual de cálculo de volume de espera. A partir da análise dos resultados, uma nova metodologia é proposta, neste artigo. Esta nova metodologia combina duas das metodologias: cálculo do volume de espera desconsiderando os volumes alocados na recessão das trajetórias críticas e alteração dos volumes de espera no final da estação chuvosa de acordo com a informação hidrológica do início do período chuvoso. Dentre as quatro propostas, esta última apresenta melhor resultado em termos de alocação eficiente de volume de espera.

**Palavras-chave:** Planejamento da Operação de reservatórios, Controle de Cheias, Geração Hidrelétrica, Usos múltiplos.

---

### INTRODUÇÃO

Até meados da década de 1970 grande parte dos reservatórios do setor elétrico tinha como único objetivo a geração de energia elétrica e portanto o controle de cheias não era contemplado no planejamento da operação do sistema de reservatórios do setor. A partir de 1977, devido à ocorrência de uma grande cheia no rio Pardo, o controle de cheias passou a fazer parte do Planejamento da Operação do Sistema Hidrotérmico Brasileiro (SIN), com o objetivo de garantir a segurança estrutural dos aproveitamentos e de evitar que haja defluências superiores aos respectivos limites superiores a que estão restritas (Kyrillos, 2006).

A consideração de mais este uso aos reservatórios causa um conflito com a geração de energia elétrica, uma vez que cada uso procura utilizar diferentemente os volumes úteis dos reservatórios. Adicionalmente, nos anos em que as aflúncias no final da estação chuvosa são baixas, os reservatórios do

SIN que alocam volume de espera podem não conseguir terminar a estação chuvosa cheios, o que pode trazer problemas para a geração de energia elétrica durante a estação seca seguinte. Com o intuito de minimizar tais problemas, tornou-se necessário o contínuo aprimoramento de metodologias de cálculo de volume de espera buscando otimizar a alocação destes volumes.

Frente a isso, no primeiro artigo desta série de dois artigos foram apresentadas três propostas metodológicas todas com o objetivo de aumentar a chance de iniciar a estação seca com os reservatórios do setor elétrico utilizados para controle de cheias, plenamente cheios. De uma forma geral, as propostas procuram calcular volumes de espera menores preservando-se o risco desejado.

A primeira proposta consiste em alterar o cálculo das trajetórias críticas desconsiderando a parte associada à recessão destas trajetórias. Chamamos esta alternativa de “*Alteração no Cálculo das Trajetórias Críticas*”. A segunda proposta, admitindo que se dispõe de uma previsão de vazão perfeita

para um horizonte de “d” dias, desconsidera os volumes de espera para o período que se dispõe de previsão. Chamamos esta alternativa de **“Consideração da Previsão de Vazões no Cálculo das Trajetórias Críticas”**. A terceira proposta não modifica o cálculo das trajetórias críticas, mas propõe alterar a envoltória destas trajetórias em uma data fixa no período final da estação, considerando informações hidrológicas dos meses anteriores a esta data. Chamamos a terceira proposta de **“Alteração dos Volumes de Espera no Final da Estação Chuvosa de acordo com Informação Hidrológica do Início da Estação”** (Raupp, 2008).

Neste segundo artigo da série, estas propostas são aplicadas na bacia do rio Paraná, com o intuito de verificar a aplicabilidade e eficácia das propostas (Raupp, 2008).

### ESTUDO DE CASO: BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANÁ

As metodologias propostas foram aplicadas à Bacia do Rio Paraná. Sua escolha foi feita, por ser uma bacia de grande importância para produção de energia elétrica e apresentar necessidade significativa de alocação de volumes de espera sazonais.

Como pode ser observado na Figura 1, a bacia do Paraná até Porto São José possui 20 usinas com reservatório, 17 utilizados para controle de cheias, 20 usinas a fio d’água e 18 pontos de controle de cheias, isto é, usinas onde existem restrições de nível d’água ou de vazão máxima a jusante. O volume total dos reservatórios da bacia é de aproximadamente 106 km<sup>3</sup> e a capacidade de geração da bacia é de 25.517 MWmed, o que representa aproximadamente 30% da geração total do país. A estação chuvosa da bacia compreende os meses de Novembro a Abril e o volume de espera total máximo alocado nesta bacia ocorre em janeiro, com um valor no entorno de 18 km<sup>3</sup> (ONS, 2006).

A restrição mais impactante para o cálculo dos volumes de espera para esta bacia é a que se localiza a jusante da usina hidroelétrica (UHE) Jupiá, uma vez que o tempo de retorno associado a vazão de restrição é baixo (4 anos) e o reservatório da UHE Jupiá é a fio d’água e portanto não contribui para a prevenção de cheias. Desta maneira, os reservatórios a montante de Jupiá são os responsáveis em alocar volume de espera para que a restrição de vazão a jusante seja respeitada.

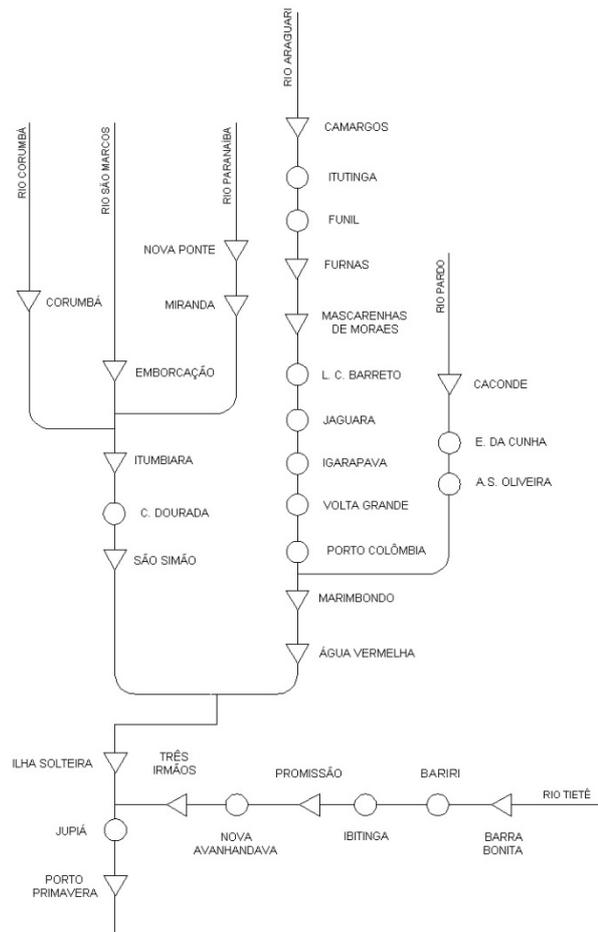


Figura 1 - Topológico da bacia do Paraná até Porto São José.

O cálculo dos volumes de espera, nesta bacia, é feito através das condições de controlabilidade (Damázio, 1988), uma vez que esta bacia apresenta múltiplos reservatórios e múltiplos pontos de controle de cheias. Porém, por simplificação, para aplicação das metodologias propostas, considerou-se apenas o ponto de controle a jusante da UHE Jupiá e a bacia do Paraná, até esta usina, foi considerada como um reservatório equivalente até este ponto de controle. A restrição de vazão máxima a jusante de Jupiá é 16.000 m<sup>3</sup>/s (valor oficialmente adotado nos estudos anuais de prevenção de cheias realizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS). Considerou-se como capacidade de armazenamento do reservatório equivalente a soma dos volumes úteis dos reservatórios desta bacia localizados a montante da UHE Jupiá. A série histórica de vazão natural afluente à UHE Jupiá foi obtida totalizando-se as vazões incrementais dos aproveitamentos a montan-

te desta usina, uma vez que estava disponível, apenas, o arquivo de vazões incrementais da Bacia do Rio Paraná. Estas séries foram disponibilizadas pelo ONS, e referem-se às aflúências diárias do período de novembro a abril, dos anos de 1949 a 2003 (55 séries).

## APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS

### Proposta 1: Alteração no Cálculo das Trajetórias Críticas

Neste item são apresentados os resultados da aplicação da metodologia de alteração no cálculo das trajetórias críticas (Raupp, 2008), proposta 1 do primeiro artigo desta série.

A partir da série histórica de vazões naturais afluentes à UHE de Jupuí, foram gerados 12000 cenários sintéticos de aflúências diárias através do modelo estocástico DIANA (Kelman et al, 1983). Foram calculadas as trajetórias críticas de cada cenário de acordo com a metodologia original (ONS, 2006) e também de acordo com a proposta 1 do primeiro artigo desta série. O critério de descarte de cenários adotado foi o máximo reenchimento. O tempo de retorno considerado foi de 30 anos (valor utilizado nos estudos de prevenção de cheias realizados pelo ONS), resultando na não proteção de 400 cenários sintéticos (número total de cenários – 12000 - dividido pelo tempo de retorno utilizado – 30 anos) do conjunto de 12000 cenários.

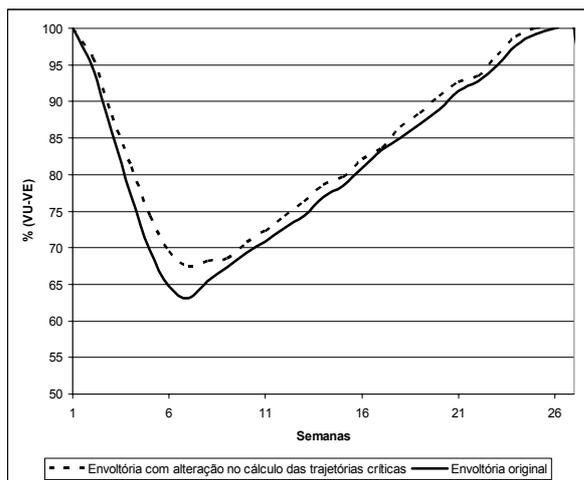


Figura 2 – Comparação entre as envoltórias original e a calculada a partir da proposta 1.

A Figura 2 possibilita a comparação entre as envoltórias obtidas. Analisando as duas envoltórias, pode-se verificar uma antecipação de uma semana na data final de necessidade de volumes de espera, isto é, na envoltória obtida pela alteração do cálculo da trajetória crítica o volume de espera fica igual a zero num período de tempo anterior à envoltória praticada (original), e uma diferença na alocação de volume de espera ao longo do período chuvoso, resultando em pouco mais de 4% de diferença no pico máximo de volume de espera (na semana 7).

### Conclusão da proposta 1

Para a primeira metodologia proposta, *alteração no cálculo das trajetórias críticas*, acreditava-se que, por desconsiderar o final da alocação de volume de espera nas trajetórias críticas dos cenários, haveria uma diminuição de alocação de volume mais acentuada no final da estação chuvosa. O que se verificou, neste caso específico, foi uma diminuição já no início do período, explicada pelo diferente descarte de 400 cenários de cada uma das metodologias, e uma diferença não muito grande no final da curva, devido ao fato das trajetórias críticas apresentarem alocação máxima de volume de espera em instantes de tempo distintos ao longo de todo o período. Neste caso-teste, pelo formato da envoltória, pode-se concluir que os picos de cheias de alguns cenários se localizam no final da estação. Por outro lado, os picos de cheias localizados no final da estação são bem menores.

### Proposta 2: Consideração da Previsão de Vazões no Cálculo das Trajetórias Críticas

Neste item são apresentados os resultados da aplicação da metodologia de consideração da previsão de vazões no cálculo das trajetórias críticas (Raupp, 2008 e Raupp et al, 2008).

Os mesmos 12000 cenários sintéticos de aflúências diárias gerados utilizando o modelo estocástico DIANA foram utilizados para calcular as trajetórias críticas. Para o cálculo das envoltórias (segundo metodologia original e segundo proposta 2 do primeiro artigo) foram considerados o mesmo tempo de retorno (30 anos), resultando na não proteção de 400 cenários sintéticos, o mesmo critério de descarte de cenários (máximo reenchimento) e a mesma vazão de restrição em Jupuí (16000 m<sup>3</sup>/s).

Como a alteração na trajetória crítica, será mais significativa quanto maior o horizonte da previsão, esta metodologia foi aplicada para horizontes

de previsão de 3 e 10 dias. Nas Figuras 3 e 4, são apresentadas as envoltórias para toda a estação chuvosa, para os dois horizontes de previsão. Pode-se observar que as envoltórias calculadas com as duas metodologias (original e utilizando proposta 2 no cálculo das trajetórias críticas) são muito próximas. Considerando a previsão de vazão para 3 dias a frente, houve antecipação de reenchimento em apenas 1 dia e para previsão 10 dias a frente houve antecipação de 8 dias no reenchimento do reservatório.

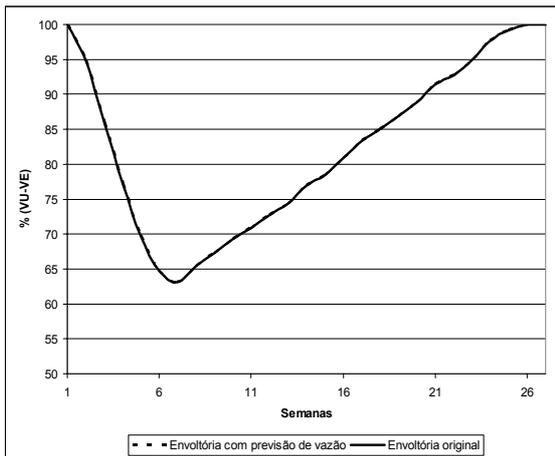


Figura 3 - Comparação entre a envoltória original e a envoltória utilizando previsão de vazões de horizonte de 3 dias.

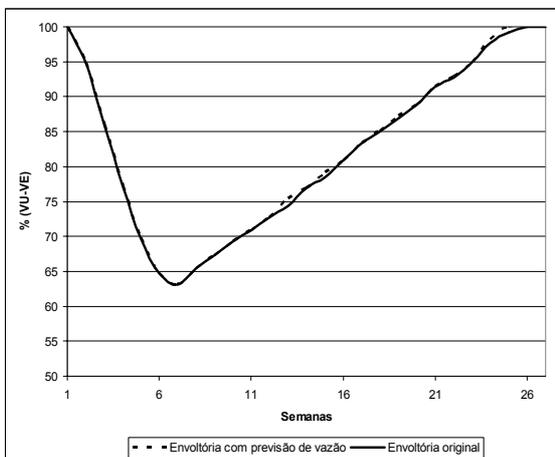


Figura 4 – Comparação entre a envoltória original e a envoltória utilizando previsão de vazões de horizonte de 10 dias.

A partir destes resultados, pode-se concluir que a influência da previsão de aflúências diárias na alocação de volumes de espera para o controle de

cheias só será relevante quando o horizonte da previsão é significativo, ou seja, quando o horizonte for tal que englobe, pelo menos, a duração da cheia prevista, pois, desta forma, será possível não alocar previamente parte da curva de volume de espera. Previsões para poucos dias a frente, onde se possui uma maior probabilidade de acerto, influenciam muito pouco na alocação de volume de espera. Isto se deve ao fato das durações das cheias dos cenários utilizados serem em geral, superiores a 10 dias. Analisando as estatísticas das durações das cheias dos cenários sintéticos (só foram considerados os cenários que apresentaram vazões superiores a restrição de 16000 m<sup>3</sup>/s, que representam 36% dos 12000 cenários sintéticos), verificou-se que a duração média das cheias foi 20,1 dias, o desvio-padrão de 22,9 dias e a duração máxima 106 dias. A partir da distribuição acumulada de probabilidades das durações das cheias (Figura 5), observa-se que apenas 10% das cheias possuem duração menor ou igual a 3 dias e 34% possuem duração menor ou igual a 10 dias, o que explica a pequena influência destas previsões no cálculo das trajetórias críticas.

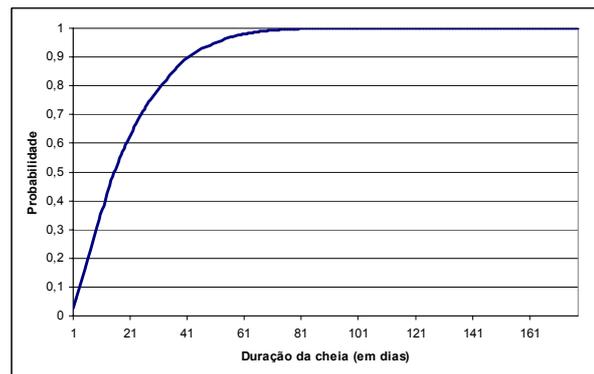


Figura 5 – Distribuição acumulada das durações das cheias nos cenários sintéticos dado que houve cheia no cenário.

A Figura 6 possibilita a comparação entre a envoltória calculada pela metodologia original com a envoltória calculada pela metodologia da proposta 2 utilizando uma previsão de vazão com horizonte de 20 dias, que corresponde à média de duração das cheias dos cenários sintéticos utilizados. Por este gráfico, pode-se observar a diminuição na alocação de volume de espera e uma antecipação de enchimento do reservatório de três semanas. Isto é, de acordo com a envoltória praticada (original) o reservatório fica cheio (volume de espera igual a zero) na semana 25, enquanto que a envoltória obtida utilizando previsão de vazões fica cheio na semana

21. Desta forma, parece razoável imaginar que o uso da previsão de vazões no cálculo das trajetórias críticas pode vir a ser interessante, quando esta informação estiver disponível com boa qualidade e horizonte próximo da duração média das cheias.

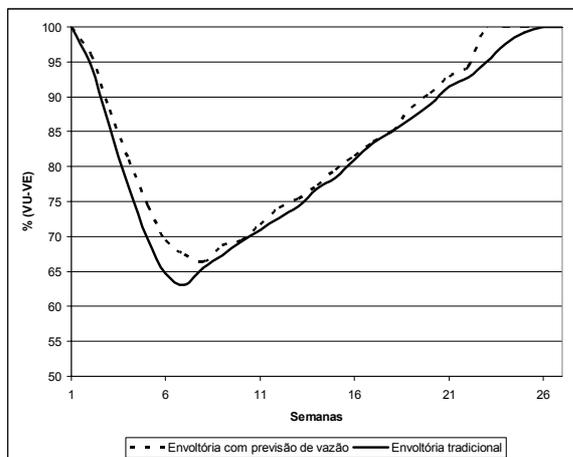


Figura 6 - Comparação entre envoltória original e a envoltória utilizando previsão de vazão de horizonte de 20 dias.

A título de ilustração, na Figura 7 é apresentada a comparação das envoltórias considerando a previsão de vazão com antecedência de 90 dias. Neste caso, houve uma antecipação de 102 dias e resultou em uma curva de volume de espera praticamente nula, isto se deve ao fato de a probabilidade da duração da cheia (Figura 5) ser menor ou igual a 90 dias é muito próximo de 1 (100% de chance).

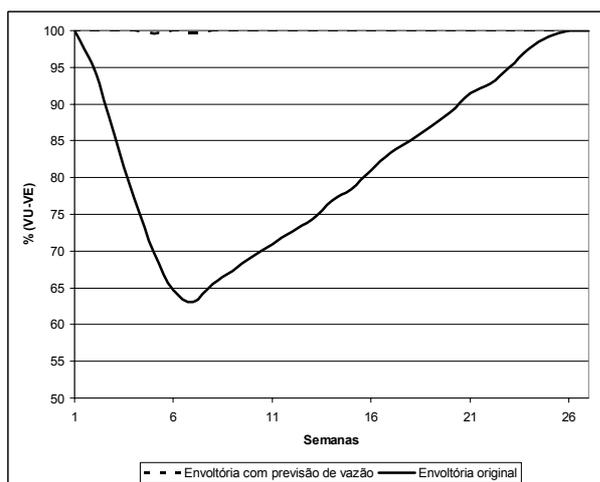


Figura 7 – Comparação entre a envoltória original e a envoltória utilizando previsão de vazões de horizonte de 90 dias.

### Conclusão da proposta 2

Os resultados da segunda metodologia, *consideração da previsão de vazões no cálculo das trajetórias críticas*, mostraram que a eficiência desta proposta está diretamente associada às características hidrológicas da bacia, em especial à distribuição de probabilidades das durações das cheias e à previsibilidade das afluições (acerto e antecipação). Bacias cujas durações das cheias e a antecipação da previsão sejam mais próximas apresentarão resultados mais interessantes. É importante ressaltar que, no entanto, em geral, não se dispõe de previsões de vazão com grandes horizontes ou estas previsões são imprecisas.

Desta maneira, seria interessante analisar a possibilidade de utilização de previsões que possuem algum erro, ou seja, previsões que não possuem 100% de acerto, como salientado no primeiro artigo desta série.

### Proposta 3: Alteração dos Volumes de Espera no Final da Estação Chuvosa de Acordo com a Informação Hidrológica do Início da Estação

Neste item são apresentados os resultados obtidos adotando-se a metodologia para uso das informações hidrológicas do passado recente no cálculo dos volumes de espera da proposta 3. Esta metodologia consiste em tentar relacionar a informação hidrológica passada (meses iniciais da estação chuvosa) com a ocorrência de cheias futuras durante os meses finais da estação (Raupp, 2008).

A fim de verificar qual a melhor data de divisão da estação chuvosa em meses iniciais e finais, foram consideradas três alternativas: (i) Março a Abril; (ii) Abril; e (iii) Fevereiro a Abril. A proposta destas três datas se baseou no conhecimento da distribuição temporal das cheias na bacia do rio Paraná, na qual se observa uma diminuição na magnitude das cheias a partir de Março, e uma grande variabilidade do comportamento das cheias em Janeiro e Fevereiro. Uma vez que a alternativa que apresentou o melhor resultado foi a segunda, somente seus resultados serão detalhados e apresentados a seguir.

### Escolha da Variável Explicativa

A primeira decisão a ser tomada para aplicação da metodologia é a escolha da combinação de vazões médias mensais do período inicial (Novembro a Fevereiro) da estação chuvosa que melhor

explica o comportamento das cheias (vazões máximas de diferentes durações) nos meses finais da estação (Março e Abril). Esta escolha é feita através da correlação das vazões médias mensais para os conjuntos de meses Novembro a Fevereiro (Nov-Fev), Dezembro a Fevereiro (Dez-Fev), Janeiro a Fevereiro (Jan-Fev) e Fevereiro (Fev) com as séries de vazões máximas de diferentes durações (1 dia, 7 dias e 15 dias) no período de Março a Abril, apresentada na Tabela 1.

Os dados da Tabela 1 permitem que se conclua que as duas combinações de meses iniciais que apresentam maior correlação com as vazões máximas de Março a Abril são Jan-Fev e Fevereiro. As vazões médias mensais destes meses foram, então, selecionadas como variáveis que explicam o comportamento das cheias no período de Março a Abril.

Foi, então, utilizada a técnica de árvore de regressão (Mathsoft, 1999), que agrupa informações com mesmas características dentro de uma mesma classe, para, através das vazões médias mensais do período Jan-Fev, classificar as 55 estações chuvosas da série histórica. O mesmo procedimento foi feito para a vazão mensal de Fevereiro e esta apresentou melhor resultado que o anterior. Os resultados desta última classificação serão detalhados a seguir.

**Tabela 1 - Matriz de correlação entre a combinação de meses no período de Novembro a Fevereiro e vazões máximas de diferentes durações no período Mar-Abr.**

| 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    |

### Divisão em Classes

A escolha do número de classes deve levar em consideração alguns fatores:

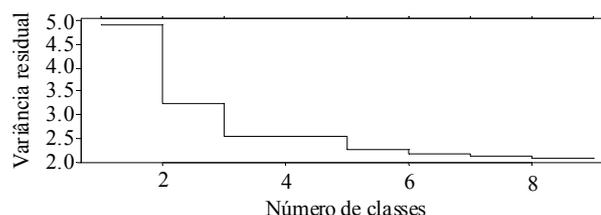
- Quanto menor a variância residual, maior a capacidade da classificação obtida explicar o comportamento da variável a ser prevista;
- O número de séries do histórico em cada classe tem que ser suficiente para a estimação dos parâmetros do modelo de geração de cenários sintéticos; e
- Parcimônia na escolha do número de classes, só se justificando aumentar o número

de classes se houver um aumento significativo na explicação do comportamento das cheias em Mar-Abr, ou seja, diminuição da variância residual.

Na Figura 8 é apresentado o gráfico da variância residual versus o número de classes, resultado da aplicação da árvore de regressão.

De acordo com as considerações anteriores, escolheu-se classificar as vazões de Fevereiro em 3 classes (Alta, Média e Baixa), tendo em vista que esta divisão reduz a variância residual em 50%, que foi comparada com as reduções de variância residual de 40% referente a divisão em 2 classes e de 50% para a divisão em 4 classes. Obteve-se a árvore de classificação com os seguintes intervalos:

- Classe Baixa: vazão média mensal de Fevereiro inferior a 7.625,0 m<sup>3</sup>/s;
- Classe Média: vazão média mensal de Fevereiro entre 7.625,0 m<sup>3</sup>/s e 13.479,5 m<sup>3</sup>/s;
- Classe Alta: vazão média mensal de Fevereiro superior a 13.479,5 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 8 – Gráfico de variância residual versus número de classes para Fevereiro.**

Na Figura 9 é apresentado o gráfico da vazão média mensal de Fevereiro versus a vazão máxima diária em Março-Abril. As linhas verticais são os limites entre as classes, de acordo com o valor da vazão média mensal de Fevereiro. As linhas horizontais tracejadas representam as médias das vazões máximas diárias em Março-Abril para cada classe.

Nesta figura, verificam-se as diferenças entre as três nuvens de pontos, o que significa uma boa classificação, uma vez que, dentro de cada classe suas respectivas nuvens de pontos se encontram próximos das médias de cada classe.

Na Figura 10 são apresentadas as distribuições acumuladas de probabilidades das vazões máximas condicionadas às classes, podendo-se observar diferenças significativas entre as três distribuições.

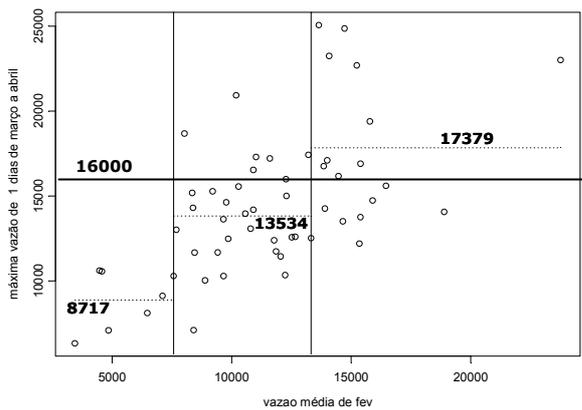


Figura 9 - Vazões máximas diárias de Março a Abril e a vazão média mensal de Fevereiro.

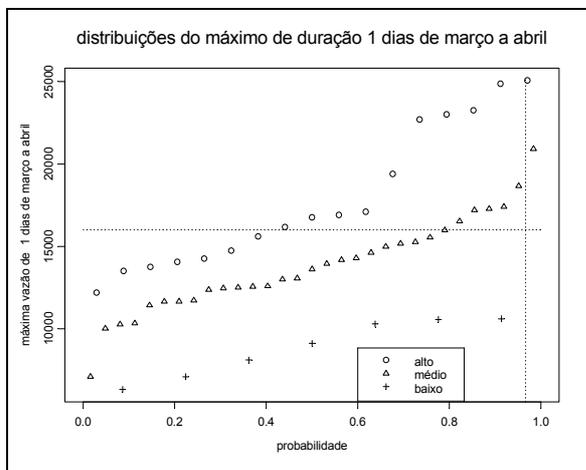


Figura 10 – Distribuições acumuladas de probabilidades das vazões máximas no período de Março a Abril condicionadas as classes das vazões médias mensais de Fevereiro.

Após a classificação dos 55 anos da série histórica, de acordo com a vazão média de Fevereiro, utilizando o modelo DIANA, foram gerados três conjuntos de cenários sintéticos, cada um condicionado à uma das classes de vazão média mensal de Fevereiro, totalizando 12000 cenários sintéticos, conforme metodologia apresentada no primeiro artigo desta série. O número de cenários sintéticos de cada conjunto foi feito proporcional ao número de anos do histórico pertencente a cada classe (conforme Tabela 2).

Após a geração dos cenários sintéticos, foram calculadas suas respectivas trajetórias críticas e a envoltória para todo o período, de acordo com a

metodologia original (ONS, 2006), considerando o tempo de retorno de 30 anos e o máximo reenchi-mento como critério de descarte.

Dos 400 cenários que não serão protegidos, 230 ( $\bar{N}_{FIM}$ ) não foram protegidos no período de Março a Abril. Na Tabela 2 é apresentada a distribuição pelas classes destes 230 cenários.

Tabela 2 – Número de cenários não-protegidos de Março a Abril por classe.

| Classe       | Série Histórica | Nº de cenários | Nº cenários não protegidos de Março-Abril |
|--------------|-----------------|----------------|-------------------------------------------|
| Baixa        | 7 (12,7%)       | 1527           | 0                                         |
| Média        | 31 (56,4%)      | 6763           | 4                                         |
| Alta         | 17 (30,9%)      | 3710           | 226                                       |
| <b>Total</b> | <b>55</b>       | <b>12000</b>   | <b>230</b>                                |

A seguir foram calculadas as envoltórias para o período Março-Abril para o conjunto de cenários de cada classe, considerando como número de cenários não protegidos os valores da coluna 4 da Tabela 2. Na Figura 11 são apresentadas as envoltórias correspondentes a cada classe para o período Março-Abril e a envoltória para todo o período independente da classificação, obtida considerando o conjunto de 12000 cenários sintéticos (desconsiderando-se os 400 cenários não protegidos), formados pelos conjuntos de cenários correspondentes às três classes. A linha vertical representa a data de tomada de decisão (1º de Março), ou seja, data de escolha da envoltória a ser considerada a partir de então, de acordo com a vazão média de Fevereiro observada.

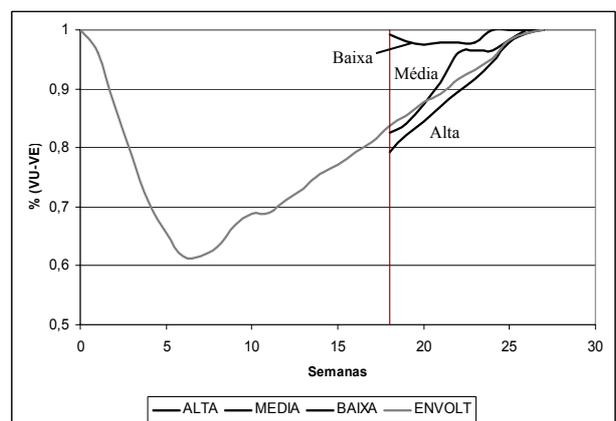


Figura 11 – Envoltória com alteração de volume de espera em 1º de Março com 3 classes.

### Conclusão da proposta 3

A terceira metodologia mostrou-se promissora, uma vez que, de acordo com a classe da vazão média mensal dos meses iniciais da estação chuvosa, haverá uma alocação de volume de espera diferenciada, possibilitando uma maior garantia de reservatórios cheios ao final da estação. Para o estudo de caso, foram consideradas três diferentes divisões da estação chuvosa.

A primeira divisão, onde os meses de Março e Abril foram considerados como o final da estação chuvosa, apresentou o melhor resultado dentre as três divisões, uma vez que as três classes (Alta, Média e Baixa) da vazão média mensal de Fevereiro se mostraram bastante homogêneas e coerentes com a ocorrência de cheias nos meses finais da estação. Embora a envoltória da classe Alta tenha alocado um maior volume de espera no momento da tomada de decisão (no dia 1º de março) em relação à envoltória obtida pelo método original, as duas envoltórias alcançam o enchimento completo do reservatório no mesmo instante de tempo. A classe Média antecipou o enchimento em uma semana e apresentou-se próxima da envoltória obtida pelo método original, excetuando-se nas semanas 22 a 24, que permitiu uma antecipação de enchimento. A classe Baixa teve uma antecipação de enchimento em três semanas e uma diferença acentuada de alocação de volume de espera.

Na segunda divisão da estação chuvosa, onde o mês de Abril foi considerado como o final da estação, a alteração da envoltória ocorre muito próxima do final da estação, podendo não ser viável o enchimento dos reservatórios em tão pouco tempo.

Alterar a envoltória original em 1º de Fevereiro, ou seja, considerando como período final da estação chuvosa os meses de Fevereiro a Abril, não se mostrou eficaz, pois, a informação do mês anterior (vazão média mensal do mês de Janeiro) não agrega muita informação sobre a ocorrência de cheias nos meses seguintes da estação chuvosa, uma vez que as classes Média e Alta obtiveram praticamente a mesma curva de volume de espera.

### Consideração de duas datas para tomada de decisão

Uma outra possibilidade seria considerar duas datas para a tomada de decisão de alteração da envoltória. A primeira no dia 1º de Março, de acordo com a vazão média mensal observada no mês de Fevereiro e alterar, novamente, a envoltória no dia 1º de Abril, conforme a vazão média mensal observada no mês de Março.

A primeira análise a ser feita consiste em verificar a correlação entre as vazões médias mensais que ocorrem em Fevereiro (para a primeira decisão) com as que ocorrem em Março (para a segunda decisão). Ou seja, dado que a vazão mensal de Fevereiro pertence a uma determinada classe, qual a probabilidade da vazão mensal de Março pertencer a cada uma das três classes. Uma primeira avaliação foi feita considerando a série histórica e é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Frequência de ocorrência das combinações de classes das vazões mensais de Fevereiro e de Março.

|           | Baixo | Médio | Alto  | Total |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
|           | Março | Março | Março |       |
| Baixo     | 6     | 1     | 0     | 7     |
| Fevereiro |       |       |       |       |
| Médio     | 4     | 20    | 7     | 31    |
| Fevereiro |       |       |       |       |
| Alto      | 0     | 8     | 9     | 17    |
| Fevereiro |       |       |       |       |
| Total     | 10    | 29    | 16    | 55    |

De acordo com a Tabela 3, verifica-se que quando, no histórico, a vazão média mensal de Fevereiro é Baixa, a vazão média mensal de Março não poderá ser classificada como Alta. Similarmente, quando a vazão média mensal de Fevereiro é Alta, não ocorre vazão média mensal Baixa em Março. Para a alteração da envoltória em dois momentos, os cenários sintéticos condicionados a serem utilizados para construção das envoltórias a serem adotadas a partir de 1º de Abril teriam que ser condicionados as sete classes resultantes da combinação dos estados das vazões médias mensais de Fevereiro e Março, quais sejam: Baixo-Baixo, Baixo-Médio, Médio-Baixo, Médio-Médio, Médio-Alto, Alto-Médio e Alto-Alto, o que resultaria em um número muito pequeno de anos do histórico para cada classe, conforme pode ser observado no número de ocorrências apresentado na Tabela 3, inviabilizando uma boa estimação dos parâmetros para a geração dos cenários sintéticos.

## PROPOSTA 4: COMBINAÇÃO DE METODOLOGIAS

### Proposta 04: Teoria

Uma vez que a primeira proposta apresentou uma alocação mais eficiente de volume de espe-

ra e que a terceira proposta apresentou resultados muito satisfatórios, decidiu-se verificar qual o ganho em agregar as duas propostas, ou seja, alterar o cálculo das trajetórias críticas, conforme proposta 1, e considerar que em 1º de Março haverá uma tomada de decisão de acordo com a vazão média mensal de Fevereiro observada, e substituir a envoltória original por uma das três envoltórias correspondente a classe Alta, Média ou Baixa (Raupp, 2008).

Os passos listados a seguir destacam, em itálico, as modificações na metodologia original correspondentes a junção destas propostas:

1. Geração *de 3 conjuntos* de cenários sintéticos de aflúncias (*proporcionais ao histórico*), *cada um condicionado a uma classe (Alta, Média e Baixa)*;
2. Cálculo das trajetórias críticas dos cenários, *com alteração no cálculo de acordo com a proposta 1*;
3. Seleção dos cenários que serão protegidos, de acordo com o tempo de retorno definido;
4. Cálculo da envoltória, desconsiderando os cenários que não serão protegidos;
5. *Determinação dos cenários que não são protegidos em Março-Abril e a que classe pertencem*;
6. *Cálculo da envoltória para cada classe (Alta, Média e Baixa), para Março-Abril, não considerando os respectivos cenários que não serão protegidos.*

#### Proposta 4: Aplicação

Para o cálculo das trajetórias críticas e envoltórias foram utilizados 12000 cenários sintéticos e tempo de retorno de 30 anos, descartando 400 cenários. As trajetórias críticas utilizadas para a construção das envoltórias das três classes (Baixa, Média e Alta) apresentadas nesta metodologia tiveram seu cálculo modificado, segundo proposta 1 do primeiro artigo.

Na Tabela 4 é apresentado, para comparação, o número de cenários não protegidos em Mar-Abr para cada classe e o risco associado, considerando a metodologia original para o cálculo das trajetórias críticas e a metodologia da proposta 1 para o cálculo das trajetórias críticas.

Na Figura 12 são apresentadas as envoltórias de todo o período e das três classes para o período Mar-Abr.

Pela Figura 12, é possível observar que da mesma maneira que aconteceu sem a alteração no cálculo das trajetórias críticas, as classes se mostraram bem distintas quanto à alocação de volume de espera. Para a classe Alta, existe uma antecipação de enchimento em 9 dias, para a classe Média de 13 dias e para a classe Baixa de 24 dias. A classe Média, no início do mês de Março, aloca um volume de espera muito próximo da envoltória original, mas depois diminui a alocação, antecipando o enchimento. A classe Alta aloca mais volume de espera, como era de se esperar, mas o enchimento acontece no mesmo período.

Tabela 4 – Número de cenários não-protegidos de Março a Abril e risco por classe

| Classificação | Nº de Cenários | Nº cenários não protegidos de Março-Abril |                        |
|---------------|----------------|-------------------------------------------|------------------------|
|               |                | Metodologia original                      | Metodologia Proposta 1 |
| Independente  | 12000          | 230                                       | 109                    |
| Baixa         | $N_B = 1527$   | 0                                         | 0                      |
| Média         | $N_M = 6763$   | 4                                         | 2                      |
| Alta          | $N_A = 3710$   | 226                                       | 107                    |

Nas Figuras 13 e 14 são apresentadas as comparações das três classes utilizando o cálculo das trajetórias críticas sem alteração (original) e com alteração (revista).

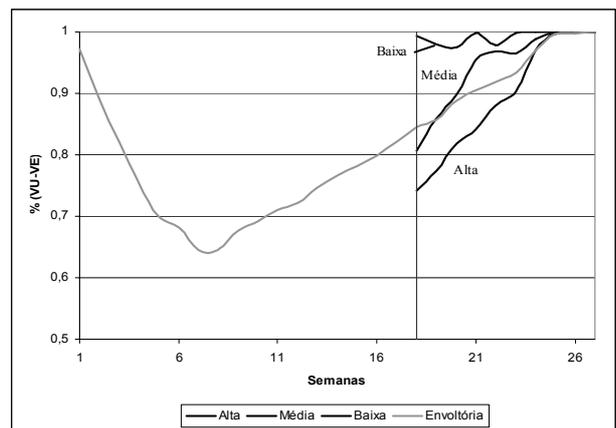
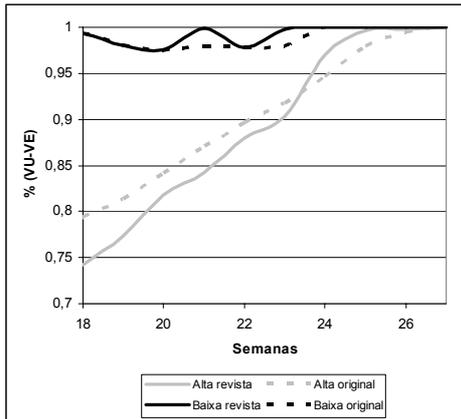
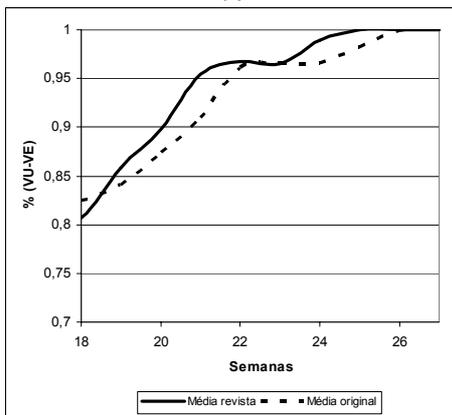


Figura 12 - Envoltória com alteração de volume de espera em Março com 3 classes, utilizando trajetórias críticas modificadas pela proposta 1.



(a)



(b)

Figura 13 - Comparação entre as envoltórias das classes baixa e alta (a) e média (b) para a recuperação de volume de espera original e com alteração no cálculo das trajetórias críticas.

Tabela 5 – Comparação da antecipação do enchimento dos volumes de espera para cada classe.

| Classificação | Antecipação do reenchimento (em semanas) |         |
|---------------|------------------------------------------|---------|
|               | Original                                 | Revista |
| Baixa         | 3                                        | 4       |
| Média         | 1                                        | 2       |
| Alta          | 0                                        | 2       |

Pelas Figuras 13a e 13b observa-se que para as classes Baixa e Média, as envoltórias revistas alocam um menor volume de espera e permitem a antecipação do enchimento em uma semana (vide Tabela 5). A classe Alta revista alocou mais volume de espera, o que pode ser explicado pelo menor número de cenários desta classe que foram descartados para o período de Mar-Abr na construção da

envoltória, como visto na Tabela 4. Porém, mesmo alocando um maior volume, a classe Alta antecipa o enchimento duas semanas antes da envoltória da classe Alta original.

#### Conclusão da proposta 4

Finalmente, como tanto a primeira quanto a terceira proposta apresentaram resultados promissores em relação ao objetivo deste artigo, as duas metodologias foram aplicadas conjuntamente, imaginando-se com isto que o resultado seria melhor. Ou seja, aplicou-se, no estudo de caso, a metodologia de alteração da envoltória de volume de espera para os meses de Março e Abril, de acordo com a vazão média do mês de Fevereiro, utilizando, para o cálculo das envoltórias, trajetórias críticas que desconsideram, em seu cálculo, os volumes referentes à recessão destas trajetórias. Como esperado, o resultado obtido foi melhor que os obtidos da aplicação em separado das propostas, ocorrendo antecipação de enchimento do reservatório para todas as classes e menor alocação de volume de espera para as classes Baixa e Média. Ou seja, além de alocar volume de acordo com as informações hidrológicas do início da estação chuvosa, se utilizou trajetórias críticas mais otimizadas, desconsiderando a recessão destas.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados apresentados neste artigo, pode-se concluir que as propostas se apresentam como possíveis aprimoramentos a serem aplicados sobre a metodologia original de cálculo da curva de volume de espera, na busca por reservatórios cheios ao final da estação chuvosa. Mas, para tanto, recomenda-se: (i) adaptar estas metodologias para bacias com múltiplos reservatórios e múltiplos pontos de controle, ou seja, adaptá-las para serem utilizadas no cálculo das trajetórias crítica através das condições de controlabilidade. Observa-se que os resultados apresentados foram obtidos considerando um único reservatório e um único ponto de controle; (ii) aplicar as metodologias em outras bacias com características hidrológicas diferentes, para verificar seu efeito nos volumes de espera (por exemplo, identificar outras datas para tomada de decisão, outras divisões da estação chuvosa, maiores ganhos com o cálculo das trajetórias crítica desconsiderando a parte das recessões das cheias); e finalmente (iii) verificar se em alguma bacia onde os reservatórios são utilizados para o controle de cheias

e a geração de energia elétrica a duração das cheias e a qualidade e horizonte das previsões vazões, faz com que o uso desta informação torne o cálculo dos volumes de espera mais eficiente.

Vale ressaltar que, embora o estudo de caso considerado neste artigo tenha feito a simplificação de considerar a bacia do rio Paraná como um reservatório equivalente, as metodologias propostas podem ser diretamente aplicadas a algumas situações reais do SIN, como é o caso do controle de cheias a jusante das UHE's Boa Esperança, no rio Parnaíba e Três Marias, no Rio São Francisco. Nestes casos, o controle de cheias considera apenas o reservatório imediatamente a montante do ponto de controle de cheias para alocação de volume de espera e proteção deste ponto de controle, não necessitando, portanto, de extensão das metodologias para sistemas com múltiplos reservatórios e múltiplos pontos de controle.

## REFERÊNCIAS

- 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, Brasil
- 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.
- KYRILLOS, D.S., 2006, Otimização da Programação da Operação Diária em Situação Normal de Cheias e em Situação de Emergência em Reservatórios de Sistemas Hidroelétricos, Tese de D.Sc., COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MATHSOFT, 1999, S-Plus 2000, Guide to Statistics, Vol.1, Data Analysis Products Division, Math Soft, Seattle, WA.
- ONS, 2006, Plano Anual de Prevenção de Cheias (Ciclo 2006-2007), Rio de Janeiro, RJ, Setembro.
- RAUPP, I.P., 2008, Minimização do Conflito entre a Geração de Energia Elétrica e o Controle de Cheias no Planejamento da Operação de Reservatórios, Dissertação de M.Sc., COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- RAUPP, I.P., COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M., 2008, "Uso da Previsão de Vazões para Minimização do Conflito entre a Geração de Energia Elétrica e o Controle de Cheias no Planejamento da Operação de Reservatórios", II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Outubro.

## *Minimization Of The Conflict Between Electric Power Generation And Flood Control In Reservoir Operation Planning II: Implementation*

### ABSTRACT

*One of the particularities of the Interconnected Brazilian Hydrothermal System operation planning is the need to use part of the volumes of the hydroelectric plants reservoirs as waiting volumes for attenuation of possible floods. These volumes are calculated through the Flood Prevention Studies, based on the Critical Paths of the synthetic flow scenarios. The use of the reservoir volumes for electricity generation and flood control is subject to conflict, since the former attempts to keep the reservoirs as full as possible and the latter to keep them partly empty, for the same period. Thus, the first article, of this series of two, presented three methodological proposals: i) Disregard the waiting volumes allocated for critical paths recession, ii) Use the forecast flows to calculate the critical path and iii) Change the waiting volumes at the end of the rainy season according to the average monthly flow observed in the initial months of the season. In this article, all methodologies proposed were tested in the River Paraná basin to check their applicability and effectiveness. For simplification, the River Parana basin was considered as an equivalent reservoir until the reservoir of Jupia, considering just one flood control point downstream of this plant. According to the results, a new methodology is proposed combining two of the methodologies proposed, with better results.*

**Key-words:** *Reservoir operation planning, Flood control, Hydroelectric generation, Multiple uses.*