

Otimização de Regras de Operação de Reservatórios com Incorporação da Previsão de Vazão

Juan Martín Bravo, Walter Collischonn, Carlos Eduardo Morelli Tucci

Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS

jumarbra@yahoo.com.ar, collischonn@iph.ufrgs.br, tucci@iph.ufrgs.br

Jorge Víctor Pilar

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina.

jpilar@ing.unne.edu.ar

Recebido: 30/08/07 – revisado: 19/11/07 – aceito: 03/03/08

RESUMO

Em uma seqüência de dois artigos são avaliados os benefícios da previsão de vazão de afluência na operação de um reservatório. Neste primeiro trabalho é apresentada uma metodologia para a otimização de regras de operação para controle de cheias (curvas-guia) de um reservatório com base na previsão de vazão, utilizando uma técnica de parametrização, simulação e otimização. Segundo a metodologia apresentada, a curva-guia é representada por segmentos de reta, sendo as coordenadas dos extremos desses segmentos as variáveis de decisão. Um método de otimização por simulação, baseado em um algoritmo evolucionário e na simulação de balanço hídrico do reservatório em intervalo de tempo diário, é utilizado para otimizar a curva-guia parametrizada. O modelo foi aplicado a um problema baseado nos dados do reservatório de Três Marias, no Rio São Francisco, no período de 1964 a 2001. A regra de operação otimizada foi testada posteriormente em um período de verificação, de 1931 a 1964. Nos dois períodos as vazões observadas (naturais) foram utilizadas como previsões de vazão para o futuro, num cenário ideal ou de previsões perfeitas. Os resultados mostram que a definição de regras de operação baseadas em curvas-guia parametrizadas e na combinação de modelos de otimização e simulação é uma alternativa viável para este tipo de problema. No segundo artigo as previsões perfeitas são substituídas por previsões reais, obtidas a partir de previsões quantitativas de chuva aplicadas a um modelo hidrológico de transformação chuva-vazão.

Palavras-chave: otimização da operação de reservatórios, previsão de vazão, algoritmo evolucionário, AMANDA.

INTRODUÇÃO

Entre as obras hidráulicas que podem ser criadas para alocação da água para diferentes usos, os reservatórios têm assumido grande relevância ao longo da história. Entretanto, de acordo com o *World Commission on Dams* (WCD, 2000), muitos projetos de reservatórios falham em produzir os benefícios que justificaram sua viabilidade. Além disso, sendo a água um dos mais importantes recursos naturais, os operadores são pressionados a operar seus sistemas de forma cada vez mais eficiente (Bessler et al., 2003).

Existem diferentes regras de operação de reservatórios, mas todas usam como variável de decisão o volume do reservatório ou a vazão defluente que se pretende atingir em determinados períodos de tempo como o diário, semanal ou mensal (Loucks et al., 1981). Essas regras visam atender as

restrições de vazão defluente e demandas do sistema para otimizar determinados objetivos (Mays e Tung, 1992).

Uma das regras de operação mais utilizadas inclui a divisão do volume útil do reservatório em diferentes zonas que possuem políticas de descargas específicas (Wurbs, 1996). A distribuição do volume útil do reservatório nessas zonas pode ser constante ao longo do ano ou pode variar de forma sazonal. Essas regras de operação são chamadas de curvas-guia e usadas para indicar volumes (ou níveis d'água) alvos ou ideais do reservatório visando determinados objetivos.

A técnica aqui utilizada para definir as curvas-guia otimizadas usa as seguintes etapas: parametrização, simulação e otimização. Esta técnica foi utilizada por diversos pesquisadores para definir regras de operação de um reservatório (por exemplo, Chen, 2003; Tung et al., 2003; Chang et al., 2005; Bravo, 2006; Bravo et al., 2006) e de um siste-

ma de reservatórios (por exemplo, Oliveira e Loucks, 1997; Nalbantis e Koutsoyiannis, 1997; Koutsoyiannis et al., 2002; Koutsoyiannis e Economou, 2003).

No presente trabalho a aplicabilidade dessa metodologia é expandida para a definição de regras de operação otimizadas com base na previsão de vazão afluente ao reservatório. Nesse sentido, um modelo de simulação da operação de um reservatório com base na previsão de vazão, denominado AMANDA (Bravo, 2006; Bravo et al., 2005), é utilizado.

A metodologia foi aplicada a um problema baseado nos dados do reservatório de Três Marias, no rio São Francisco, Minas Gerais, considerando dois usos para o reservatório: geração de energia e controle de cheias.

CURVA-GUIA PARA CONTROLE DE CHEIAS

A geração de energia e o controle de cheias por um reservatório, são objetivos conflitantes. Para atender estes objetivos, o nível d'água no reservatório é reduzido no início e durante o período chuvoso, para permitir amortecer vazões afluente altas. Em função disso, ocorre uma redução da produção energética, se comparada ao cenário de maximização do nível d'água no reservatório que representaria a operação otimizada desde o ponto de vista da geração de energia. O volume criado no reservatório pelo rebaixamento do nível é denominado de *volume de espera*.

O volume de espera pode ser constante ao longo do ano, ou variável de acordo com a sazonalidade das chuvas. Valores máximos de volumes de espera são necessários na época de maior precipitação e valores mínimos podem ser adotados durante os meses de pouca chuva. A curva definida pela relação entre o nível d'água necessário para garantir um determinado volume de espera e a época do ano é chamada de *curva-guia para controle de cheias*.

Esta curva representa uma regra de operação simples para controle de cheias que pode ser expressa como segue: se o nível d'água no reservatório estiver acima da curva-guia é necessário verter; se estiver abaixo não é necessário verter. Um exemplo simples de curva-guia é apresentado na Figura 1.

A operação definida pela curva-guia é diferente se o nível do reservatório se encontra na posição indicada por "A" ou "B" (Figura 1) embora estes pontos representem uma mesma cota. Assim, na situação dada pelo ponto A, não é necessário verter,

porque o ponto está abaixo da curva-guia. Na situação B é necessário verter até alcançar novamente a curva-guia. Com vazões afluente favoráveis (vazões altas), o nível d'água do reservatório segue a curva-guia. Com vazões afluente desfavoráveis o nível d'água fica abaixo da curva-guia.

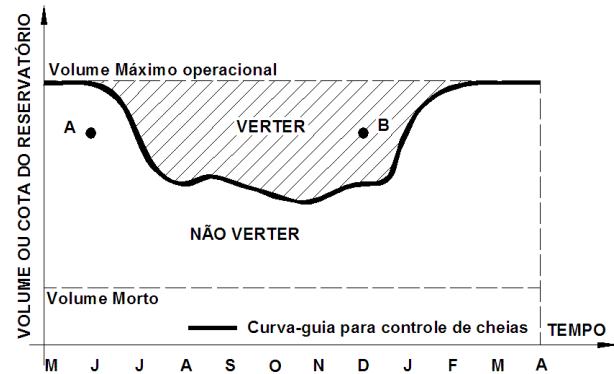


Figura 1 - Exemplo de curva-guia para controle de cheias com volume de espera variável durante o ano.

No Brasil, onde a geração de energia e o controle de cheias são os usos principais dos reservatórios de grande porte, o Operador Nacional do Sistema (ONS) utiliza duas metodologias para definir os volumes de espera em reservatórios com operação isolada para controle de cheias (ONS, 2003): 1) o método da curva volume-duração (Beard, 1963); 2) o método das trajetórias críticas (Kelman, 1987). Por sua vez, uma abordagem alternativa foi apresentada em Bravo (2006) e Bravo et al. (2006) baseada numa técnica de parametrização, simulação e otimização. Nesta abordagem, uma curva-guia para controle de cheias foi otimizada com base em simulações da operação do reservatório.

Embora essas metodologias tenham o objetivo de minimizar os conflitos entre os usos da água do reservatório, a operação resultante pode ser menos eficiente quando ocorrem eventos de magnitudes diferentes aos implicitamente considerados como de "projeto" na adoção do volume de espera. A perda de eficiência pode ser consequência de dois motivos: 1) vertimentos desnecessários com objetivo de manutenção do volume de espera previamente definido, no caso do evento ocorrido ser de magnitude inferior que os de projeto; 2) ocorrência de um evento de magnitude superior aos de projeto, pois serão desrespeitadas algumas das restrições do controle de cheias a montante e a jusante do reservatório.

O conhecimento das vazões afluentes ao reservatório, estimadas pela previsão, permitiria definir certo grau de flexibilidade aos volumes de espera e trazer benefícios na operação do reservatório. A incorporação da previsão de vazão afluente na operação do reservatório permitiria, no primeiro caso acima, diminuir os volumes de espera evitando vertimentos desnecessários. No segundo caso, criaria um volume de espera adicional para reduzir a magnitude das quebras de restrição.

PARAMETRIZAÇÃO, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO

A parametrização, simulação e otimização é uma técnica que permite definir a operação ótima de um reservatório ou de um sistema de reservatórios utilizando um número reduzido de variáveis de decisão.

A parametrização das curvas-guia permite reduzir o número de graus de liberdade do sistema fazendo-o independentemente do número de intervalos de tempo considerados na simulação.

Na operação de reservatórios, as curvas-guia podem ser representadas por segmentos de retas (parametrização), sendo as coordenadas dos extremos dessas retas as variáveis de decisão. As curvas-guia assim definidas são utilizadas por um modelo de simulação na operação de um reservatório ou de um sistema de reservatórios. Por fim, o modelo de simulação é acoplado a um modelo de otimização para produzir regras de operação otimizadas.

A técnica de parametrização, simulação e otimização parece ter sido inicialmente utilizada para definir regras de operação de sistemas com múltiplos reservatórios (Oliveira e Loucks, 1997 e Nalbantis e Koutsoyiannis, 1997).

Koutsoyiannis e Economou (2003) avaliaram o desempenho dessa técnica na operação de um sistema de reservatórios comparando os resultados obtidos aos de outras duas metodologias que não consideravam a parametrização. Demonstraram que na situação mais desfavorável a técnica de parametrização, simulação e otimização produziu resultados 1,90% inferiores aos resultados obtidos com a melhor das técnicas alternativas. Na maioria dos exercícios desenvolvidos o resultado foi praticamente igual. A diferença no número das variáveis de decisão entre a abordagem em análise e as demais foi significativa, favorecendo de forma ampla à utilização da parametrização.

A técnica de parametrização, simulação e otimização foi utilizada também para definir a operação ótima de um reservatório com múltiplos usos. Nesse caso, múltiplas curvas-guia podem ser parametrizadas para definir a operação do reservatório. Chen (2003); Tung et al. (2003) e Chang et al. (2005) utilizaram até três curvas-guia parametrizadas para definir zonas, dentro do volume útil do reservatório, com diferentes políticas de operação. A estratégia que permitiu o melhor resultado utilizou algumas variáveis de decisão comuns entre as diferentes curvas-guia. Desta forma, apesar de ter curvas-guia múltiplas, o número de variáveis de decisão permaneceu reduzido.

Finalmente, algoritmos evolucionários como, os algoritmos genéticos, foram utilizados na otimização das regras de operação na maioria dos casos apresentados previamente (por exemplo, Chen, 2003; Tung et al., 2003 e Chang et al., 2005), sendo as ferramentas ideais e de preferência dos pesquisadores que empregaram o método em análise.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada na otimização da curva-guia com base na previsão de vazão é baseada na técnica de parametrização, simulação e otimização, como apresentado na Figura 2, e utiliza os seguintes modelos: (1) modelo de previsão de vazão afluente ao reservatório; (2) modelo de parametrização da curva-guia; (3) modelo de simulação da operação do reservatório com base na previsão de vazão (AMANDA); (4) algoritmo de otimização da curva-guia.

Segundo a metodologia o modelo de otimização (um algoritmo evolucionário) comanda o processo definindo os valores das variáveis de decisão (coordenadas dos pontos de quebra da curva-guia para controle de cheias) a serem testados e através das quais é obtida a curva-guia representada por segmentos de reta. Essa curva-guia abrange um período anual com uma discretização diária e será utilizada em cada ano do período de simulação. Por sua vez o modelo de previsão de vazão define as previsões ao longo do período analisado.

A curva-guia, as previsões de vazão e as características do reservatório são os dados de entrada ao modelo de simulação da operação (AMANDA). O modelo AMANDA define as vazões vertidas, turbinadas, defluentes e os níveis da água no reservatório para cada intervalo de tempo. Com base nesses

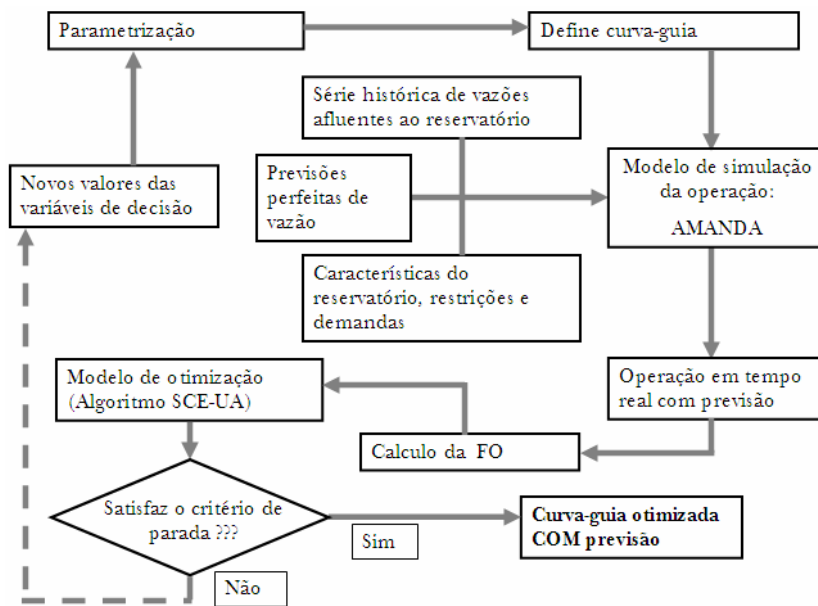


Figura 2 - Metodologia de parametrização, simulação e otimização utilizada na definição de curvas-guia otimizadas para a operação em tempo real com previsão de um reservatório.

resultados é calculado o valor de uma função-objetivo que é utilizado pelo modelo de otimização para avaliar o desempenho da curva-guia. Esse processo se repete em forma iterativa, em cada iteração novos valores das variáveis de decisão são testados até satisfazer um critério de parada. Os modelos utilizados na metodologia são apresentados a seguir.

Modelo de previsão de vazão afluente

A previsão de vazão é a estimativa de valores de vazão para um ou mais intervalos de tempo específicos no futuro. O intervalo de tempo no futuro, que define a antecedência das previsões, recebe o nome de horizonte de previsão. Por sua vez, a frequência de previsão define o período de tempo no qual são emitidos novos dados de previsão. Assim por exemplo, uma previsão de vazão que se estende por 3 dias e que é repetida a cada dia tem uma frequência diária e um horizonte de 3 dias. Neste trabalho esta previsão será denominada resumidamente 1-3 (frequência-horizonte).

O modelo de previsão de vazão não é aqui descrito e pode ser avaliado no segundo artigo da sequência (Bravo *et al.*, *inpress2*). Neste primeiro artigo são utilizadas previsões perfeitas de vazão (vazões observadas como previsão).

Modelo de parametrização da curva-guia

De acordo com a metodologia adotada a curva-guia é representada por segmentos de retas, considerando as coordenadas dos pontos extremos destes segmentos como as variáveis de decisão. Na Figura 3 é apresentada uma curva-guia representada por cinco segmentos de reta. Cinco pontos no espaço Cota x Tempo definem a curva-guia, o que significa que há 10 variáveis de decisão. Uma curva-guia pode ser parametrizada com um número qualquer (n) de segmentos de retas, dependendo da complexidade exigida, mas é preciso lembrar que o número de variáveis de decisão é dado por $2 \times n$. Alguns trabalhos anteriores (Tung *et al.*, 2003; Chen, 2003; Bravo, 2006; Bravo *et al.*, 2006) mostraram que é possível obter curvas-guia satisfatórias com menos de 10 pontos.

Eventualmente, uma curva-guia pode ser parametrizada considerando fixos os tempos T_1 a T_n . Nesse caso apenas as cotas C_1 a C_n são modificadas, o que pode contribuir para reduzir a dimensão do problema de otimização. Essa abordagem foi utilizada neste trabalho tornando as cotas C_1 a C_n as variáveis de decisão no problema de otimização.

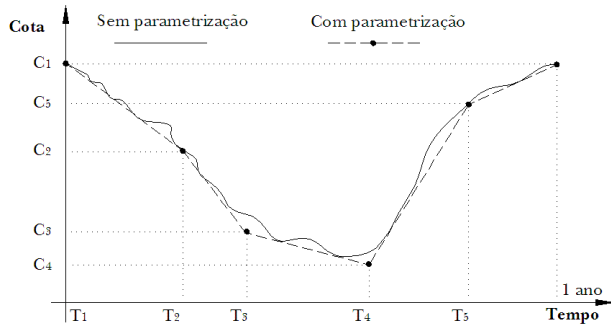


Figura 3 - Curva-guia parametrizada, representada por segmentos de retas.

O Modelo AMANDA

O modelo AMANDA (*Algorithm for MANAge-ment of DAmS*; Bravo, 2006; Bravo et al., 2005) define a operação em tempo real de um reservatório com base na previsão de vazão e em uma curva-guia para controle de cheias. A maior vantagem desse modelo é que permite a flexibilização da curva-guia para controle de cheias em função dos dados de previsão. A flexibilização da curva-guia consiste no aumento ou diminuição dos volumes de espera definidos pela curva-guia com base na informação de previsão.

O AMANDA é integrado pelo modelo de balanço hídrico do reservatório e os módulos de previsão de operação e operação real, descrito adiante no texto.

Modelo de balanço hídrico do reservatório

A Figura 4 apresenta as principais variáveis intervenientes na operação de um reservatório.

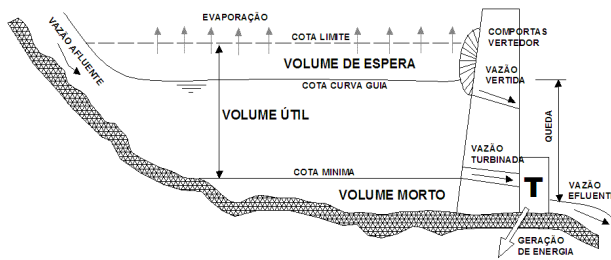


Figura 4 - Variáveis intervenientes na operação de um reservatório.

O modelo de balanço hídrico do reservatório utiliza, em cada intervalo de tempo, uma expressão discretizada da equação de continuidade (eq. 1).

$$V_t = V_{t-1} + \left(\frac{QA_{t-1} + QA_t}{2} \right) \times \frac{\Delta t}{10^6} - \left(\frac{QE_{t-1} + QE_t}{2} \right) \times \frac{\Delta t}{10^6} - \frac{E_t \times A_{t-1}}{10^3} \quad (1)$$

Nesta equação t-1 indica o intervalo de tempo anterior; t indica o intervalo de tempo atual; V_t é o volume do reservatório em t (hm^3); V_{t-1} é o volume do reservatório em t-1 (hm^3); QA_{t-1} é a vazão afluinte em t-1 ($m^3.s^{-1}$); QA_t é a vazão afluinte em t ($m^3.s^{-1}$); QE_{t-1} é a vazão defluente em t-1 ($m^3.s^{-1}$); QE_t é a vazão defluente em t ($m^3.s^{-1}$); Δt é o intervalo de tempo (s); E_t é a evaporação líquida diária no tempo t (mm); A_{t-1} é a área do reservatório (km^2) para um volume V_{t-1} .

A cada intervalo de tempo essa equação é resolvida para o termo V_t , considerando conhecidas as vazões afluentes (QA) nos tempos t-1 e t, e a existência de uma relação direta entre a vazão defluente e o volume armazenado (ou o nível d'água no reservatório). Assim, o volume V_t define a vazão defluente QE_{t+1} e a vazão defluente QE_t é definida pelo volume armazenado no intervalo anterior (V_{t-1}).

Trata-se, portanto, de um método explícito de solução da equação de balanço hídrico. Considerou-se esta simplificação na forma de resolver a equação válida porque foi utilizado um intervalo de tempo diário, que é relativamente pequeno considerando o volume útil do reservatório para o qual foi feita a aplicação.

A vazão defluente total é dada pela soma da vazão turbinada e vertida (eq. 2):

$$QE_t = QT_t + QV_t \quad (2)$$

onde QE_t é a vazão defluente em t ($m^3.s^{-1}$); QV_t é vazão vertida em t ($m^3.s^{-1}$) função da cota do reservatório em t-1; QT_t é a vazão turbinada em t ($m^3.s^{-1}$). Considera-se, de forma simplificada, que a vazão turbinada é uma função unívoca da cota ou do volume do reservatório no tempo t-1.

A aplicação da equação 1 recursivamente ao longo de toda a série de vazões afluentes observadas resulta em uma série de volumes e níveis d'água (H_t) correspondentes. Entretanto, uma das seguintes situações pode ocorrer no final de um intervalo de tempo: 1) o volume calculado V_t resulta em H_t igual ou inferior ao da curva-guia; 2) H_t é superior ao indicado pela curva-guia.

No caso 1, a vazão de vertimento QV_t do próximo intervalo de tempo é igual a zero. No caso 2, a vazão de vertimento no próximo intervalo de tempo é tal que ao final do balanço o nível d'água é exatamente igual ao nível definido pela curva-guia. Para isto, o valor da vazão vertida é calculado de acordo com equação 3:

$$QV_{t+1} = 2 \times \frac{10^6}{\Delta t} \times \left(V_t - V_{reg_{t+1}} - \frac{E_{t+1} \times A_t}{10^3} \right) + QA_t + QA_{t+1} - QE_t - QT_{t+1} \quad (3)$$

onde QV_{t+1} é a vazão vertida em $t+1$; V_t é o volume do reservatório em t ; QA_t é a vazão afluyente em t ; QA_{t+1} é a vazão afluyente em $t+1$; QE_t é a vazão defluente em t ; Δt é o intervalo de tempo; E_{t+1} é a evaporação líquida diária em $t+1$; A_t é a área do reservatório para um volume V_t ; QT_{t+1} é a vazão turbinada em $t+1$; $V_{reg_{t+1}}$ é o volume indicado pela curva-guia em $t+1$ (hm^3).

Foram consideradas duas restrições operacionais com o objetivo de evitar inundações a jusante do reservatório. Essas restrições foram: 1) limites no valor máximo da vazão defluente (Q_{lim}) e 2) limites no valor dos incrementos e decrementos da vazão defluente (QR_t) de um intervalo de tempo para o seguinte. Assim, nos intervalos de tempo em que a vazão vertida calculada pela equação 3 somada à vazão turbinada resulta em uma vazão defluente superior aos limites impostos por essas restrições, a vazão vertida é recalculada, limitando-se o seu valor para que a vazão defluente QE_{t+1} atenda essas restrições, como expresso por exemplo, pela equação 4.

$$QV_{t+1} = Q_{lim} - QT_{t+1} \quad (4)$$

Neste caso o nível d'água no reservatório pode ficar superior ao nível definido pela curva-guia, mas são respeitadas as restrições sobre a vazão defluente evitando inundações a jusante do reservatório.

Módulo de previsão de operação

O módulo de previsão de operação recebe as previsões de vazão afluyente para todos os intervalos de tempo do horizonte de previsão e realiza o balanço hídrico do reservatório segundo as equações 1 a 4. A função do módulo de previsão de operação é definir as vazões defluentes (turbinadas e vertidas), no dia em que são recebidos os dados de previsão para todos os intervalos de tempo dentro do horizonte de previsão. Isto é feito através de 1 a 3 passos, conforme o texto que segue:

- Passo 1: As vazões vertidas e turbinadas são definidas de acordo com a curva-guia e é feita a simulação do balanço hídrico do reservatório até o final do horizonte de previsão.

- Passo 2: Se necessário, corrigem-se as vazões defluentes definidas no passo 1, buscando diminuir as vazões vertidas definidas pela curva-guia.
- Passo 3: Se necessário, corrigem-se as vazões defluentes definidas no passo 1, buscando aumentar as vazões vertidas definidas pela curva-guia.

Numa primeira aproximação (passo 1), as vazões vertidas são definidas pela curva-guia e as vazões turbinadas são definidas considerando que há uma relação direta entre a vazão turbinada e o nível do reservatório. Ao final desta primeira aproximação, de acordo com a variação do nível d'água no interior do reservatório ao longo do horizonte de previsão, ocorrem diferentes situações, que podem ser agrupadas em três casos típicos, descritos pelas figuras e pelo texto que seguem:

- Caso A: o nível d'água não supera a cota definida pela curva-guia em nenhum intervalo de tempo ao longo do horizonte de previsão (Figura 5(A)).
- Caso B: o nível d'água supera a cota definida pela curva-guia em um ou mais intervalos de tempo ao longo do horizonte de previsão, mas fica abaixo da curva-guia no último intervalo do horizonte de previsão (Figura 5(B)).
- Caso C: o nível d'água supera a cota definida pela curva-guia no último intervalo do horizonte de previsão (Figura 5(C)).

Caso A

No caso A (Figura 5(A)) as vazões defluentes adotadas no passo 1 são aceitas. Neste caso, não existem vertimentos em todo o horizonte de previsão. A vazão turbinada é definida em função da cota prevista do reservatório considerando que há uma relação direta entre a vazão turbinada e o nível do reservatório. Assim, a vazão defluente é igual à vazão turbinada em cada intervalo de tempo, e os próximos passos não são executados.

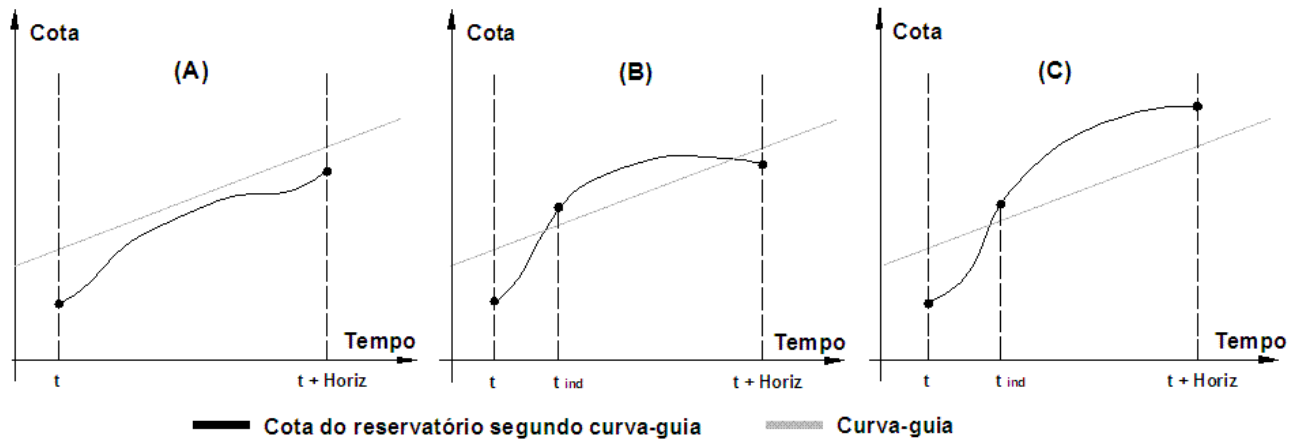


Figura 5 - Casos típicos de variações do nível d'água no interior do reservatório ao longo do horizonte de previsão.

Caso B

No caso B (Figura 5(B)), a operação do reservatório seguindo a curva-guia exige vertimentos a partir do intervalo de tempo t_{ind} , quando o nível d'água no reservatório passa a ser superior à cota definida pela curva-guia. De acordo com o modelo de balanço hídrico do reservatório, estes vertimentos devem ser os mais altos possíveis, respeitando as restrições de máximo incremento entre dias consecutivos e de máximo valor absoluto.

No caso B constata-se que as vazões vertidas poderiam ter sido menores, de forma a evitar que ao final do horizonte da previsão o nível d'água no reservatório esteja abaixo da curva-guia. Para reduzir as vazões vertidas em situações como a do caso B, é realizado o procedimento iterativo do passo 2.

O passo 2 consiste de uma flexibilização controlada da curva-guia, onde admitem-se situações em que o nível d'água do reservatório pode ficar acima da curva-guia sem que existam vertimentos, em função das informações de previsão de vazão.

Admite-se que o nível d'água no reservatório pode ficar acima da cota dada pela curva-guia, desde que o nível d'água não atinja uma região definida aqui como região de proteção (Figura 6), dada por $H_{max} - H_{seg}$, onde H_{max} é o valor da restrição que define o nível máximo operacional do reservatório (pode ainda representar o nível máximo para evitar inundações em cidades de montante) e H_{seg} é um parâmetro que reflete o grau de confiança nas previsões. Quando as previsões de vazão são perfeitas, H_{seg} pode ser igual a zero. Quando são utilizadas previsões reais, H_{seg} deve ser maior do que zero, e o seu valor vai depender das características do reservatório e da qualidade das previsões de vazão utilizadas.

O passo 2 pode ser descrito pelas etapas que seguem, onde $freq$ representa a frequência de previsão (período de tempo no qual são emitidos novos dados de previsão):

Para valores de k entre 0 e $t+freq-t_{ind}$:

- Reduzir vertimentos entre $t_{ind}+k$ e $t+freq$, isto é, $QV_t = \min\{0; QVR\}$ onde QVR é o valor mínimo dos vertimentos em função de restrições nos decrementos da vazão defluente, em $m^3 \cdot s^{-1}$.
- Realizar balanço hídrico de todo o horizonte de previsão, usando as vazões vertidas reduzidas entre $t_{ind}+k$ e $t+freq$ e as vazões vertidas definidas pela curva-guia nos intervalos entre $t+freq$ e $t+horiz$, obtendo H_t (valores do nível d'água do reservatório ao longo do horizonte de previsão).
- Testar todos os valores de H_t no horizonte de previsão para verificar se são superiores ao limite $H_{max} - H_{seg}$. Em caso positivo (Figura 6(1)), incrementa o valor de k e volta à etapa a). Em caso negativo (Figura 6(2)), assume os novos valores de vazões vertidas e encerra o módulo de previsão de operação.

Se, para todos os k testados sempre ocorre pelo menos um intervalo de tempo em que $H_t > H_{max} - H_{seg}$, então segue para o passo 3 (como no caso C).

Caso C

No Caso C, apresentado na Figura 5(C), quando o nível d'água no último intervalo de tempo do horizonte da previsão é superior ao nível dado

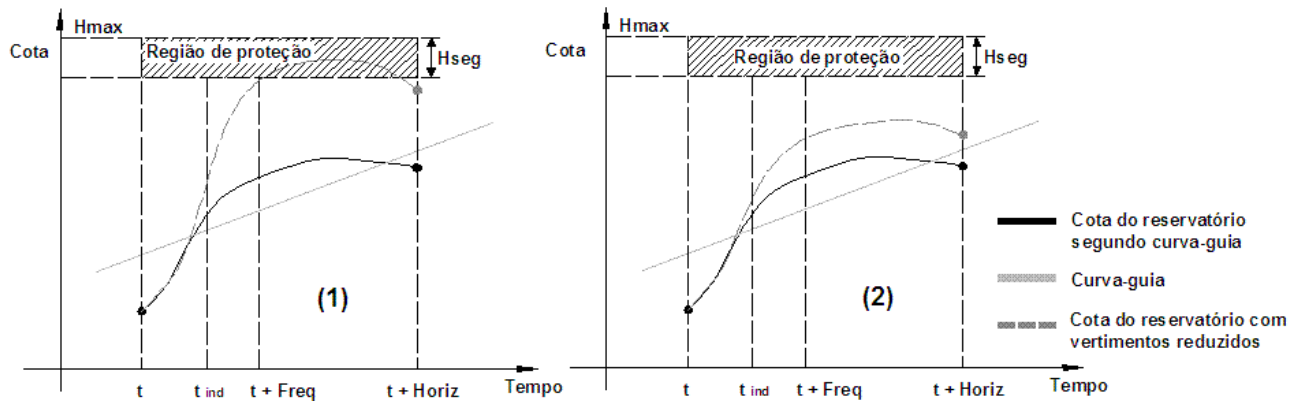


Figura 6 - Cotagramas do reservatório operado segundo a curva-guia (linha preta) e com vertimentos reduzidos (linha cinza tracejada). (1) Região de proteção é invadida no horizonte de previsão. (2) Região de proteção não é invadida.

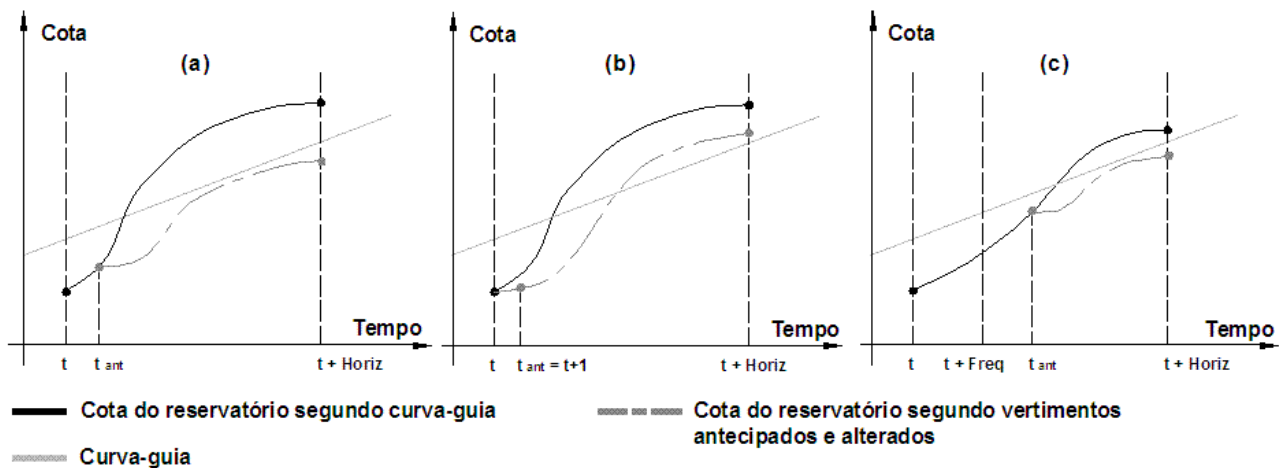


Figura 7 - (a) Exemplos de cotagrama original no reservatório, resultante do passo 1 (linha preta) e cotagrama resultante da operação com vertimentos antecipados e alterados (linha cinza tracejada). (b) Situação em que mesmo antecipando e aumentando os vertimentos ao máximo admitido pelas restrições não é possível evitar que o cotagrama no reservatório supere a curva-guia. (c) Situação em que antecipando e aumentando os vertimentos apenas após o tempo $t + freq$ é possível evitar que o cotagrama no reservatório supere a curva-guia.

pela curva-guia, o módulo secundário busca aumentar e ou antecipar os vertimentos. Os objetivos dessa alteração nos valores dos vertimentos são: 1) que o nível no último intervalo de tempo do horizonte de previsão seja igual ao definido pela curva-guia; 2) que não ocorra nenhum intervalo de tempo com o nível superior ao nível definido pela curva-guia dentro do horizonte de previsão. A metodologia de determinação do aumento e ou antecipação das vazões vertidas é realizada no passo 3.

O passo 3 é um procedimento iterativo que inicia verificando qual o volume total sobre a curva-guia ao longo do horizonte de previsão, de acordo

com a operação definida no passo 1. A partir daí, os vertimentos são antecipados e alterados, em relação aos vertimentos definidos no passo 1, buscando eliminar completamente o volume sobre a curva-guia, resultando em um cotagrama como o apresentado na Figura 7(a).

Para definir a alteração da operação em relação ao passo 1, a antecipação dos vertimentos é testada iterativamente, desde o intervalo de tempo em que o nível do reservatório excede a cota definida pela curva-guia (t_{ind}), para trás (intervalos de tempo anteriores), até o intervalo de tempo inicial do horizonte de previsão ou até a antecipação

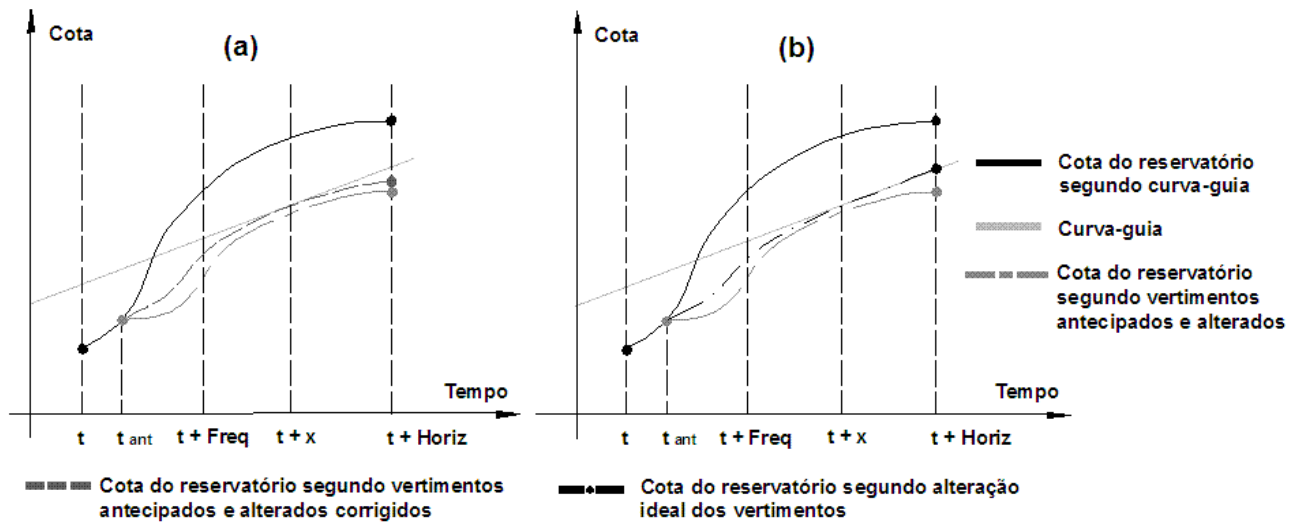


Figura 8 - (a) Exemplo de cotagrama com vertimentos alterados corrigidos (linha cinza tracejada). (b) Exemplo de cotagrama com alteração ideal dos vertimentos (linha de traços e pontos).

dos vertimentos é suficiente para eliminar o volume sobre a curva-guia.

Nesta etapa inicial, os valores dos vertimentos na antecipação se correspondem aos máximos valores que somados às respectivas vazões turbinadas, satisfazem as restrições na vazão defluente. O intervalo de tempo inicial da antecipação dos vertimentos é chamado t_{ant} (Figura 7). Com relação ao tempo t_{ant} podem ocorrer três situações, dependendo do valor de t_{ant} comparado com o tempo t (em que inicia a previsão) e com o tempo $t + freq$ (tempo em que uma nova previsão será realizada).

Se mesmo aumentando os vertimentos e antecipando seu início para o primeiro dia da operação ao longo do horizonte de previsão não é possível eliminar todos os dias em que o nível d'água no reservatório é superior à cota definida na curva-guia, como apresentado na Figura 7(b), então a operação define que os vertimentos em cada um dos dias de $t+1$ até $t+freq$ serão os máximos admitidos pelas restrições.

Se t_{ant} for superior a $t+freq$ (Figura 7(c)), então os vertimentos deverão ser aumentados apenas na próxima revisão da operação (em $t+freq$), e a operação (vazões vertidas e turbinadas) definida no passo 1 não é alterada.

Finalmente, se t_{ant} for inferior a $t+freq$ e superior ou igual a $t+1$, o cotagrama resultante da operação com vertimentos alterados é tipicamente igual ao apresentado na linha cinza tracejada, na Figura 7(a). Em geral, esta primeira aproximação resultará em níveis inferiores aos definidos pela

curva-guia, o que representa um “desperdício” de água, do ponto de vista da geração de energia.

Nesse caso inicia uma segunda etapa do passo 3, realizada de forma iterativa, que consiste numa correção dos vertimentos alterados visando dois objetivos: 1) que os vertimentos em t_{ant} sejam os mínimos necessários para que o nível d'água do reservatório não exceda à curva-guia em nenhum intervalo de tempo dentro do horizonte de previsão; 2) que o nível d'água do reservatório ao final do horizonte de previsão seja exatamente igual ao definido pela curva-guia (Figura 8(b)).

Para transformar o cotagrama alterado da Figura 7(a) no cotagrama alterado ideal da Figura 8(b) (linha de traços e pontos), são necessárias duas etapas:

1. O valor do vertimento alterado em t_{ant} , definido na etapa inicial do passo 3 (valor máximo admitido pelas restrições) é diminuído, mantendo os vertimentos no resto do horizonte de previsão iguais aos definidos na referida etapa. Esse processo é feito de forma iterativa até encontrar um intervalo de tempo, chamado de $t+x$, no qual a cota do reservatório coincide com a definida pela curva-guia e, além disso, não existem outros intervalos de tempo dentro do horizonte de previsão com cota superior à definida pela curva-guia (Figura 8(a)).
2. Os vertimentos alterados desde $t+x+1$ até o último intervalo de tempo do horizonte de

previsão ($t+Horiz$), definidos na etapa inicial do passo 3 (valores máximos admitidos pelas restrições) são diminuídos para que a cota do reservatório no último intervalo de tempo do horizonte de previsão seja exatamente igual ao da curva-guia, como apresentado na Figura 8(b).

Módulo de operação real

No módulo de operação real é realizado o balanço hídrico do reservatório com as vazões afluentes reais (observadas) e com as vazões defluentes (totais) definidas no módulo de previsão de operação.

Entretanto, a vazão turbinada definida no módulo de previsão de operação sofre alterações em função dos erros da previsão. A vazão turbinada é definida de acordo com a relação entre nível e vazão, com base nos níveis d'água reais, calculados a partir do balanço hídrico do módulo de operação real, que utiliza as vazões afluentes observadas. Para manter a vazão defluente total igual à definida no módulo de previsão de operação, a vazão vertida é modificada de forma que a soma total (vertida + turbinada) se mantenha igual à originalmente calculada.

O módulo de operação real calcula as condições iniciais reais para a próxima data em que são feitas previsões de operação ($t+freq$).

Algoritmo de otimização

No presente trabalho, a otimização dos parâmetros da curva-guia foi feita utilizando o algoritmo SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution – University of Arizona*; Duan et al., 1992). Trata-se de um algoritmo evolucionário, com características semelhantes às de um algoritmo genético. Este algoritmo tem apresentado excelentes resultados na calibração automática de modelos hidrológicos (por exemplo, Duan et al., 1992; Sorooshian e Gupta, 1995; Collischonn e Tucci, 2001; Diniz, 1999) e ainda na determinação das regras de operação lineares de sistemas de reservatórios (Koutsoyiannis et al., 2002; Koutsoyiannis e Economou, 2003).

O algoritmo SCE-UA foi criado por Duan et al. (1992) como uma combinação da estratégia de busca do método Simplex de Nelder e Mead (1965, *apud* Duan et al., 1992), com conceitos de busca aleatória supervisionada, evolução competitiva e mistura de complexos.

O algoritmo opera sobre uma população de pontos que evolui em direção ao ótimo global de

uma única função, através de sucessivas iterações e avaliações da função-objetivo. Na etapa inicial é gerada, de forma aleatória, uma população de pontos espalhados entre os limites máximos e mínimos definidos para cada variável de decisão. Esta população é separada em conjuntos (chamados de complexos) que evoluem baseados em um processo de *reprodução*. Após um determinado número de processos de reprodução os complexos são reagrupados e misturados na população. Novos complexos são separados e o processo se repete até que seja satisfeito um critério de parada.

Os dois parâmetros mais importantes do algoritmo SCE-UA que devem ser definidos pelo usuário são: o número de complexos e o número de indivíduos em cada complexo. O produto entre esses dois valores define o número de indivíduos da população inicial. Nesse trabalho os valores desses parâmetros foram definidos após uma análise de eficiência e eficácia apresentado em Bravo et al. (2006), sendo o número de complexos igual a oito e o número de indivíduos por complexo igual a 25, totalizando 200 indivíduos na população. Considerando esses valores dos parâmetros foram necessárias 480 iterações, na média, para atingir a convergência do algoritmo com uma baixa probabilidade de falha em encontrar o ótimo global do problema. Maiores informações acerca do algoritmo SCE-UA podem ser encontradas em Duan et al. (1992); Diniz (1999) e Collischonn e Tucci (2001).

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Dados do estudo de caso

O caso analisado neste trabalho corresponde, aproximadamente, ao reservatório de Três Marias, no rio São Francisco, em Minas Gerais. Neste trabalho considerou-se que o volume útil do reservatório está compreendido entre as cotas de 549,20 m e 572,50 m, representando um volume de 15278 milhões de m³. O volume útil desse reservatório representa aproximadamente 0,7 vezes o volume afluente médio durante um ano, configurando um reservatório com grande capacidade de regularização de vazão.

Este reservatório é operado de forma a evitar vazões superiores ao limite que provoca inundações na cidade de Pirapora, localizada a jusante, como mostra o esquema da Figura 9. Também é necessário evitar que o nível d'água no reservatório supere uma cota máxima a partir da qual começam

a ocorrer inundações na cidade de Morada Nova de Minas localizada a montante.

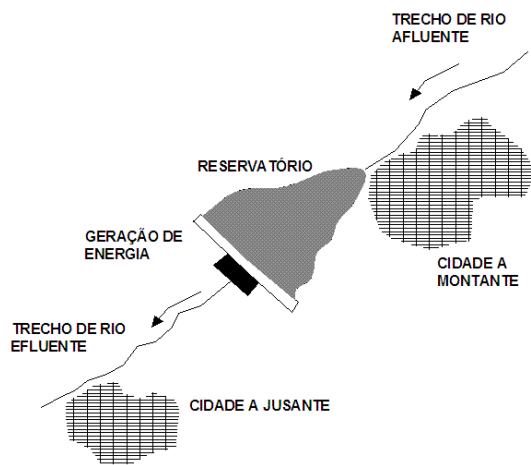


Figura 9 - Esquema da configuração espacial do sistema analisado.

Assim, embora seja possível verter uma vazão muito alta (vazão de projeto do vertedor), na operação normal existem restrições de jusante.

Para simplificar a análise, a metodologia foi aplicada a esse único reservatório, como se operasse de forma isolada. Isto representa uma simplificação, já que as usinas hidrelétricas e os reservatórios estão interligados por linhas de transmissão, e as decisões de operação levam em conta a situação do conjunto de reservatórios. Entretanto, para um aproveitamento de cabeceira, como o reservatório de Três Marias, a operação para controle de cheias pode ser considerada razoavelmente independente (ONS, 2001), de forma que, para esses casos a análise é relativamente realista.

Nesse problema simplificado foi considerado que o reservatório possui apenas, dois usos: a geração de energia e o controle de cheias.

Na operação real a vazão turbinada em Três Marias depende das decisões tomadas pelo ONS, que dependem, entre outras variáveis, da época do ano, do nível da água no reservatório, da previsão da demanda e da situação de outros reservatórios do sistema interligado. Assim, para um mesmo nível da água no reservatório podem ser turbinadas diferentes vazões em função das decisões tomadas pelo ONS.

Para simplificar a representação da vazão turbinada adotou-se neste trabalho uma relação unívoca entre o nível da água no reservatório e a

vazão turbinada. A relação entre o nível da água no reservatório e a vazão turbinada adotada se aproxima aos valores médios observados e foi baseada nos dados de potência máxima, queda, número de turbinas e vazão máxima de engolimento.

É evidente que outros resultados seriam encontrados se fosse utilizada a envoltória superior das vazões turbinadas observadas ou outra relação definida com base num critério diferente. Porém, para reduzir a influência da escolha desta relação, os resultados do segundo artigo da seqüência serão obtidos em termos relativos, isto é, percentagem de benefício em relação à operação sem previsão do mesmo sistema simplificado.

Informações hidrológicas

O balanço hídrico do reservatório simulado neste trabalho foi realizado considerando válidos os dados da série de vazões médias diárias afluentes ao reservatório de Três Marias (Figura 10). A série corresponde a um período de 71 anos que inicia em janeiro de 1931 e finaliza em novembro de 2001.

A vazão do rio São Francisco afluente a Três Marias tem uma forte variação sazonal como resultado do inverno seco e do verão chuvoso. O período chuvoso inicia em meados do mês de novembro e termina no final do mês de maio. A vazão afluente varia entre cerca de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, no período de estiagem, a valores tipicamente superiores a $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ no período de verão, com algumas cheias superiores a $5000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Observa-se na Figura 10 dois períodos relativamente distintos. No período entre os anos 30 e meados da década de 70 o evento mais importante não superou os $4500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, enquanto no final da década de 70 inicia um período mais úmido, que se estende, praticamente, até o final da década de 90. Nesse último período aconteceram seis eventos com magnitudes que superaram os $4500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, atingindo no maior deles (fevereiro de 1983), uma vazão superior a $7000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Esta diferença entre as duas metas do período disponível é importante, como é descrita adiante no texto.

A série foi dividida em dois períodos, cada um deles contendo 35 anos de dados diários. Dessa forma, o período 1964-2001 foi utilizado no processo de otimização da curva-guia e os períodos 1931-1964 e 1964-2001 foram utilizados na operação em tempo real com base na curva-guia previamente obtida.

As vazões afluentes observadas foram ainda utilizadas como previsões perfeitas de vazão. Trata-se em consequência de previsões hipotéticas que não

apresentam erros. Foi considerada uma frequência semanal e um horizonte de 12 dias (resumidamente denominada, como previsão 7-12), características que apresentam as previsões de vazão de curto prazo comumente utilizadas pelo ONS.

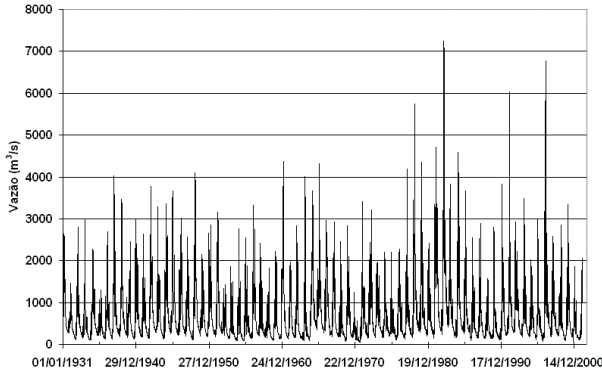


Figura 10 - Vazões diárias afluentes ao reservatório de Três Marias, no período de 1931 a 2001.

O problema de otimização

Para uma curva-guia pré-definida é possível simular a seqüência de volumes (em intervalo de tempo diário), níveis e vazões defluentes, utilizando os dados da série histórica de vazão afluente e as previsões perfeitas de vazão. Ao final da simulação o número de vezes em que é desrespeitada a restrição que limita o nível d'água no reservatório para evitar inundações na cidade de montante pode ser analisado. Dessa forma, novas curvas-guia podem ser testadas, a partir da modificação da curva-guia original, até que não ocorram mais quebras de dita restrição no nível d'água do reservatório.

Considerando que há uma relação direta entre a vazão turbinada e o nível do reservatório, a potência média gerada ao longo de um dia pode ser calculada pela equação 5. Por sua vez a potência média ao longo de toda a série analisada pode ser calculada pela equação 6:

$$Pot_t = 0.00981 \times \text{rend} \times QT_t \times (H_t - H_{cf}) \quad (5)$$

$$Pm = \frac{\sum_{t=1}^N Pot_t}{N} \quad (6)$$

onde Pot_t é a potência média gerada no dia t (MW-med); QT_t é a vazão turbinada ($m^3.s^{-1}$) em t ; H_t é a cota do nível d'água do reservatório no dia t (m); H_{cf} é a cota do nível d'água a jusante da barragem, considerada constante e igual a 518,0m; $(H_t - H_{cf})$ é a queda no dia t (m); rend é o rendimento da cen-

tral considerado constante e igual a 0,873; N é o número de intervalos de tempo da simulação e Pm é a potencia média gerada no período N (MWmed).

O problema de otimização mono-objetivo pode ser definido como apresentado a seguir, onde as variáveis de decisão são as coordenadas dos pontos de quebres que definem a curva-guia linear:

$$\text{Max} \sum_{t=1}^N Pot_t \quad (7)$$

sujeito a:

$$QE_t \leq 3000 ; \forall t \quad (8)$$

$$|\Delta QE_t| \leq 500 \text{ se } QE_t \leq 2500 ; \forall t \quad (9')$$

$$|\Delta QE_t| \leq 700 \text{ se } QE_t > 2500 ; \forall t \quad (9'')$$

$$H_t \leq 572,50 ; \forall t \quad (10)$$

onde Pot_t é a potência média gerada no dia t (MW-med – veja equação 5); N é o número de dias da série de vazões afluentes considerada na simulação; QE_t é a vazão defluente no tempo t ($m^3.s^{-1}$); ΔQE_t é o incremento ou decremento da vazão defluente entre os tempos t e $t-1$ ($m^3.s^{-1}$); H_t é o nível d'água no reservatório no tempo t (m).

A primeira restrição (eq. 8) refere-se ao valor máximo da vazão defluente total (Q_{lim}), limitado a $3000 m^3.s^{-1}$. Além disso, a vazão defluente deve respeitar as restrições que limita a sua variação de um dia para o próximo (eq. 9' e 9''). A última restrição (eq. 10) refere-se ao nível d'água no reservatório a partir do qual começam as inundações na cidade de montante, limitado a 572,50m. Todos esses valores refletem de forma muito aproximada às restrições de operação existentes no reservatório de Três Marias.

As restrições nos valores das vazões defluentes (eq. 8-9'-9'') foram consideradas no modelo de simulação da operação e, em consequência, não podem ser desrespeitadas. A última restrição foi considerada como uma penalidade na função-objetivo, conforme apresentada na equação 11. A maximização desta função-objetivo corresponde a maximizar a energia gerada sem romper a restrição de nível máximo no reservatório, imposta na forma de uma severa penalidade.

$$FO = \sum_{t=1}^N Pot_t - \text{pen}_t \quad (11)$$

onde Pot_t é a potência média gerada no dia t (MW-med); N é o número de dias da série de vazões afluentes considerada na simulação; pen_t é uma penalidade aplicada quando a cota do reservatório supera o valor da cota máxima definida pela restrição (MWmed) no dia t .

O valor dessa penalidade foi variado parametricamente em testes iniciais se verificando os valores otimizados das variáveis de decisão obtidos. Percebeu-se que considerando um valor constante o suficientemente grande, dado o pequeno número de variáveis de decisão consideradas na parametrização, era suficiente para assegurar que o ótimo global do problema seja encontrado. Dessa forma, a penalidade foi definida em um valor tão alto, que qualquer solução que não respeitasse a restrição de nível máximo era automaticamente inviabilizada como solução ótima.

Tabela 1 - Datas e cotas para otimização da curva-guia considerando dez segmentos de retas.

Data	Cota limite inferior (m)	Cota limite superior (m)
15/01	559,00	572,45
14/02	559,00	572,45
16/03	559,00	572,45
15/04	559,00	572,45
15/05	559,00	572,45
30/05	559,00	572,45
29/06	559,00	572,45
28/08	559,00	572,45
11/11	559,00	572,45
11/12	559,00	572,45

Grau de discretização da curva-guia

Após alguns experimentos iniciais constatou-se que a curva-guia para o estudo de caso poderia ser satisfatoriamente definida por 10 pontos no período 1964-2001. Esses experimentos consistiram em repetir o processo de otimização para um número crescente de pontos de quebre (variáveis de decisão) e verificar o valor encontrado da função-objetivo. A partir de um determinado número (nesse caso 10 pontos de quebre) o incremento no valor da função-objetivo com um número maior de variáveis de decisão era insignificante e, em consequência, esse era o número de pontos adotados. Maiores detalhes podem ser encontrados em Bravo et al. (2006).

As datas dos extremos dos segmentos de reta que representam a curva-guia foram pré-definidas levando em consideração a sazonalidade presente

no estudo de caso. As cotas para cada um desses pontos foram otimizadas admitindo-se a busca no intervalo de cotas entre 559,00 m e 572,45 m, conforme a Tabela 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Curva-guia otimizada

A Figura 11 apresenta a curva-guia obtida por otimização com base nos dados do período 1964-2001. Observa-se nessa figura que os volumes de espera são maiores nos meses de dezembro a abril, em coincidência com o período mais chuvoso do ano.

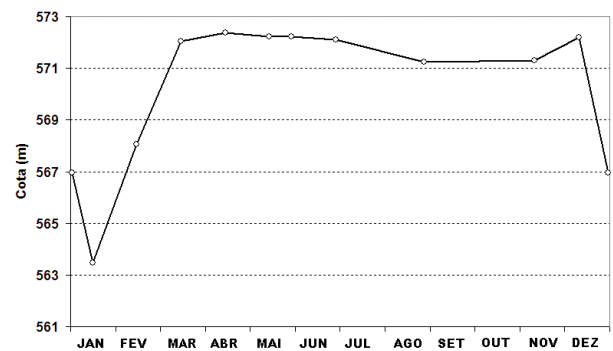


Figura 11 - Curva-guia obtida por otimização na situação de operação com previsão perfeita 7-12 no período 1964-2001.

É importante ressaltar que essa curva-guia permite a operação do reservatório utilizando o modelo AMANDA, com base na previsão perfeita de vazão 7-12, ao longo do período 1964-2001 sem que existam quebras de restrição no controle de cheias e ainda maximizando a geração de energia.

Operação em tempo real

Na condição de operação em tempo real foram simuladas duas situações diferentes, de acordo com os dados utilizados. A primeira simulação foi realizada utilizando os dados do período de 1931 a 1964 e a segunda simulação foi realizada utilizando os dados do período de 1964 a 2001. Este último período possui os eventos de projeto que originaram a curva-guia. É importante ressaltar que, em ambos casos foram utilizadas previsões perfeitas de vazão (vazões observadas) com frequência semanal e horizonte de 12 dias..

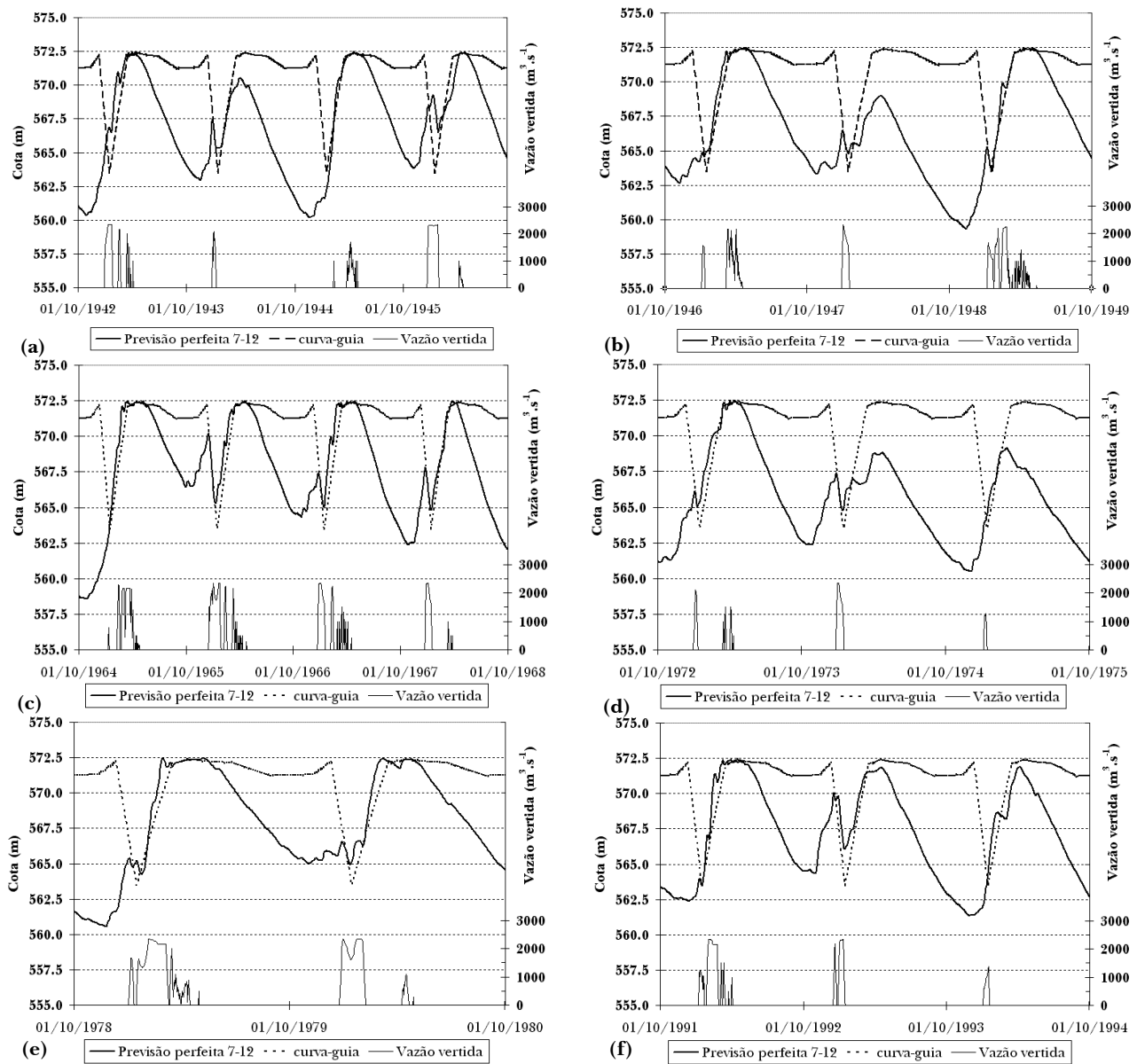


Figura 12 - Resultados da operação em tempo real utilizando o modelo AMANDA, a curva-guia otimizada com base nos dados do período 1964-2001 e previsões perfeitas de vazão 7-12, em diferentes períodos de tempo.

Os resultados obtidos em termos do nível d'água no reservatório são apresentados na Figura 12. Nesta figura são ainda apresentadas as vazões vertidas (cujo eixo é apresentado na direita) em cada um dos períodos analisados

Observa-se nesta figura que em vários dos eventos de cheias simulados os volumes de espera definidos pela curva-guia são diminuídos, não existindo posteriormente, quebras da restrição do limite máximo do nível d'água no reservatório. Isto se deve

à consideração das previsões de vazão, que permitem antecipar a ocorrência de eventos de magnitudes inferiores aos de projeto e diminuir, em consequência, os volumes de espera.

Observa-se ainda que a invasão da curva-guia é controlada por vertimentos que evitam que a posterior diminuição dos volumes de espera provoque uma quebra da restrição do nível máximo.

A diminuição dos volumes de espera, devido a que eventos de magnitudes inferiores aos de proje-

to são esperados, representaria benefícios aos operadores pela maior geração de energia, dado que o nível d'água no reservatório permaneceria mais alto na maior parte do tempo.

CONCLUSÕES

Foi apresentada uma metodologia para a otimização de regras de operação (curvas-guia) de um reservatório com base na previsão de vazão, utilizando uma técnica de parametrização, simulação e otimização. Na operação em tempo real considerando as previsões de vazão foi utilizado o modelo AMANDA, sendo o algoritmo que define seu funcionamento descrito nesse trabalho. Na otimização das regras operacionais foi utilizada uma técnica baseada em um algoritmo evolucionário.

Para a aplicação desta metodologia foram utilizados dados do reservatório de Três Marias, no Rio São Francisco. A regra de operação foi utilizada posteriormente na operação em tempo real do reservatório. Embora tenham sido utilizadas previsões perfeitas de vazão (vazões observadas) os resultados são úteis para validar a metodologia e realizar análises.

A principal vantagem desta técnica sobre as atualmente utilizadas na operação de reservatórios com operação isolada no controle de cheias é sua capacidade de flexibilizar as curvas-guia com base na informação de previsão. Essa flexibilização permitiu a diminuição dos volumes de espera quando são esperados eventos de magnitudes inferiores aos de projeto, trazendo benefícios na operação de reservatório com usos conflitantes, como o controle de cheias e a geração de energia.

Este artigo representa o primeiro de uma seqüência de dois artigos visando à avaliação dos benefícios da previsão de vazões afluentes a um reservatório sobre a sua operação. Esse artigo apresentou a metodologia de otimização de regras de operação com base na previsão. O segundo artigo dessa seqüência (Bravo et al., *in press*2) mostra como essa metodologia pode ser utilizada na avaliação dos benefícios da previsão de vazão na operação de um reservatório.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Universidade Nacional do Nordeste (UNNE, Argentina) pelo

financiamento de seus estudos de mestrado no qual foi feita essa pesquisa e ao CNPQ pela bolsa de doutorado concedida.

REFERÊNCIAS

- BEARD, L.R. (1963). Flood control operation of reservoirs. *Journal of Hydraulics Division*. v 89, n. HY1, p. 1-23.
- BESSLER, L. T.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (2003). Water reservoir control with data mining. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 129, n. 1, p. 26-34, jan./feb.
- BRAVO, J.M.; COLLISCHONN, W.; PILAR, J.V.; SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M. (2005). Operação de um reservatório com múltiplos usos com base na previsão de curto prazo de vazão. *Revista Brasileira de Energia*, (11-2), p. 85-110.
- BRAVO, J. M. (2006). Otimização da operação de um reservatório para controle de cheias com base na previsão de vazão. *Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – IPH/UFRGS*. 152p.
- BRAVO, J.M.; COLLISCHONN, W.; PILAR, J.V.; TUCCI, C.E.M. (2006). Otimização de regras de operação de reservatórios utilizando um algoritmo evolutivo. In *Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, Curitiba, PR*, 1 CD.
- BRAVO, J.M.; COLLISCHONN, W.; PILAR, J.V.; SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M. (in press2). Avaliação dos benefícios de previsões de vazão na operação de reservatórios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*.
- CHANG, F-J; CHEN, L.; CHANG, L-C. (2005). Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. *Hydrological Processes* (19), p. 2277-2289.
- CHEN, L. (2003). Real coded genetic algorithm optimization of long term reservoir operation. *Journal of the American Water Resources Association* (39-5), p. 1157-1165.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2001). Calibração automática global do modelo IPH2 in *Anais do XIV simpósio brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju SE, nov. 2001*, 1 CD.
- DINIZ, L. S. (1999). Calibragem de modelos hidrológicos, in *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Org. por Galvão, C.O. e Valença, M.J.S., ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre, RS, p. 151-164.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research* (28-4), p. 1015-1031.

- KELMAN, J. (1987). Cheias e aproveitamentos hidrelétricos. ABRH, 175 p.
- KOUTSOYIANNIS, D.; ECONOMOU, A. (2003). Evaluation of the parametrization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems. *Water Resources Research* (39-6), art. 2.
- KOUTSOYIANNIS, D.; EFSTRATIADIS, A.; KARAVOKIROS, G. (2002). A decision support tool for the management of multi-reservoir systems. *Journal of the American Water Resources Association*. (38-4), p. 945-958.
- LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A. (1981). *Water resource systems planning and analysis*. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 559 p.
- MAYS, L. W.; TUNG, Y-K. (1992). *Hydrosystems engineering and management*. McGraw-Hill Inc., New York, 530 p.
- NALBANTIS, I.; KOUTSOYIANNIS, D. (1997). A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems. *Water Resources Research* (33-9), p. 2165-2177.
- OLIVEIRA, R.; LOUCKS, D. P. (1997). Operating rules for multireservoir systems. *Water Resources Research* (33-4), p. 839-852.
- ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. (2001). Plano Anual de Prevenção de Cheias – Ciclo 2000/2001. Rio de Janeiro, jan., 110 p.
- ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. (2003). Plano Anual de Prevenção de Cheias – Ciclo 2003/2004. Rio de Janeiro, nov, 134 p.
- SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. (1995). Model calibration, in *Computer models of watershed hydrology*. SINGH, V. J. (editor). Water Resources Publications, Highlands Ranch.
- TUNG, C-P.; HSU, S-Y.; LIU, C-M.; LI, J-S. (2003). Applications of the genetic algorithm for optimizing operation rules of the LiYuTan reservoir in Taiwan. *Journal of the American Water Resources Association* (39-3), p. 649-657.
- WCD, WORLD COMMISSIONS ON DAMS. (2000). *Dams and development. A new framework for decision-making*. London, nov., 404 p. Disponível em: <<http://www.dams.org/report/contents.htm>>. Acesso em: 29 mar. 2005.
- WURBS, R. A. (1996). *Modeling and analysis of reservoir system operations*. Prentice-Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 356 p.

Optimization of Reservoir Operation Rules Including Flow Forecasting

ABSTRACT

An assessment of the benefits of streamflow forecasting in multipurpose reservoir operation is presented in two papers. This first study presents a methodology for optimization of rule-curves for reservoir operation based on inflow forecast. An operational rule in the form of a linear rule-curve was used in reservoir operation. The rule-curve was optimized through a parametrization, simulation and optimization approach using an evolutionary algorithm. The reservoir operation simulation model uses available inflow forecasts. The Três Marias dam, in the São Francisco river basin, was selected for study. This multipurpose reservoir was operated focusing on two water uses: flood control and power generation. The operation rule was used later in the real time operation of the reservoir. Flexibilization of the rule-curve based on inflow forecast information is the main advantage of the technique presented over the currently used methodologies. Flexibilization means that flood control volumes are increased when events greater than the design events are expected, and flood control volumes are reduced when smaller events than the design events are expected. Flexibilization of rule-curves provides benefits in multipurpose reservoir operation with conflicting uses, as flood control and power generation.

Keywords: Optimization of reservoir operation, inflow forecast, evolutionary algorithm, AMANDA model.