

OTIMIZAÇÃO DE REGRAS DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS UTILIZANDO UM ALGORITMO EVOLUTIVO

*Juan Martín Bravo*¹; *Walter Collischonn*²; *Jorge Víctor Pilar*³ & *Carlos E. M. Tucci*⁴

RESUMO --- Este trabalho apresenta uma metodologia para a otimização de regras de operação (curvas-guia) de um reservatório baseada numa técnica de parametrização, simulação e otimização. Por meio dessa técnica, uma curva-guia é representada por segmentos de reta, sendo as coordenadas dos extremos desses segmentos as variáveis de decisão. A curva-guia assim definida é utilizada por um modelo de simulação na operação do reservatório. Finalmente, o modelo de simulação é acoplado a um algoritmo evolutivo para definir as regras de operação otimizadas.

Como base para a aplicação dessa metodologia foram utilizados dados correspondentes ao reservatório de Três Marias, no Rio São Francisco. Os resultados obtidos mostraram que a utilização de seis ou mais segmentos de reta é suficiente para obter uma boa descrição da curva-guia no caso estudado.

A aplicabilidade do algoritmo SCE-UA na resolução do problema de otimização foi ainda avaliada. Nesse sentido, quando utilizados seis segmentos de retas para descrever a curva-guia foram necessários 140 indivíduos na população e 150 iterações, na média, para atingir a convergência do algoritmo com uma baixa probabilidade de falha em encontrar o ótimo global do problema. Esses valores mostram que o algoritmo SCE-UA apresentou eficácia e eficiência na resolução do problema.

ABSTRACT --- This study presents a methodology for the reservoir operation rules (rule-curve) optimization based on the parameterization-simulation-optimization approach. The rule-curve is represented by segments of lines, being the endpoints coordinates of this segments the variables to be optimized. The rule-curve is used by a reservoir operation simulation model whose results are used as performance measure to find optimal operation rules-curves.

The Três Marias dam, in the São Francisco river basin, was selected for the application of this methodology. The result shows that six or more straight line segments are enough to get a good description of the optimal rule-curve in the studied case.

The applicability of the SCE-UA algorithm in the optimization problem resolution was evaluated. When used six segments of straight line to describe the rule-curve, 140 individuals in the initial population and 150 iterations had been necessary, in the average, to reach the convergence of the algorithm with a low failure rate in finding the global optimum. These values show that the SCE-UA algorithm appears to be capable of efficiently and effectively solving the optimization problem and find optimal rules-curves for reservoir operation.

Palavras-chaves: operação de reservatórios, algoritmo evolutivo, parametrização de curvas-guia.

¹ Mestrando do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. IPH-UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP 91501-970. Porto Alegre. Brasil. Integrante do dpto. de hidráulica da Facultad de Ingeniería. UNNE. Argentina. Email: jumarbra@yahoo.com.ar

² Professor Adjunto da Universidade Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS). Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP 91501-970. Porto Alegre. RS. Brasil. Email: collischonn@iph.ufrgs.br

³ Profesor Titular da Facultad de Ingeniería da Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Av. Las Heras 712, CP 3503. Resistencia. Argentina. Email: jvpilar@yahoo.com

⁴ Professor Titular da Universidade Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS). Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP 91501-970. Porto Alegre. RS. Brasil. Email: tucci@iph.ufrgs.br

1- INTRODUÇÃO

Existem diferentes regras de operação de reservatórios, mas todas indicam o volume do reservatório ou a vazão efluente que se pretende atingir em determinados períodos de tempo como o diário, decenal, semanal ou mensal [Loucks et al. (1981)]. Estas regras visam atender os requerimentos de vazão efluente 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 da água) alvos ou ideais do reservatório visando determinados objetivos.

Uma técnica atualmente utilizada para definir curvas-guia otimizadas é chamada de parametrização, simulação e otimização. Essa técnica foi utilizada por diversos pesquisadores para definir regras de operação de um reservatório [Chen (2003); Tung et al. (2003); Chang et al. (2005); Bravo (2006)] e de um sistema de reservatórios [Oliveira e Loucks (1997); Nalbantis e Koutsoyiannis (1997); Koutsoyiannis et al. (2002); Koutsoyiannis e Economou (2003)].

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar a aplicabilidade do algoritmo SCE-UA [Duan et al. (1992)] para definir a regra de operação ótima de um reservatório por meio da técnica de parametrização, simulação e otimização.

2- 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.

Na operação de reservatórios, as curvas-guia podem ser representadas por segmentos de reta (parametrização), sendo as coordenadas dos extremos desses segmentos 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. Finalmente, o modelo de simulação é acoplado a um modelo de otimização para definir as regras de operação otimizadas. Assim, essa técnica permite reduzir o número de graus de liberdade do sistema fazendo-o independentemente do número de intervalos de tempo considerados na simulação.

A técnica de parametrização, simulação e otimização é originária da operação de múltiplos reservatórios. Trabalhos pioneiros como os de Oliveira e Loucks (1997) e Nalbantis e Koutsoyiannis (1997) definiram uma regra de operação ótima de um sistema de reservatórios em

termos de duas curvas-guia parametrizadas. A primeira curva-guia indicava os alvos de armazenamento em cada reservatório em função do armazenamento do sistema (figura 1 (a)). Por sua vez, a segunda curva-guia definia as vazões efluentes do conjunto de reservatórios em função do armazenamento do sistema (figura 1 (b)).

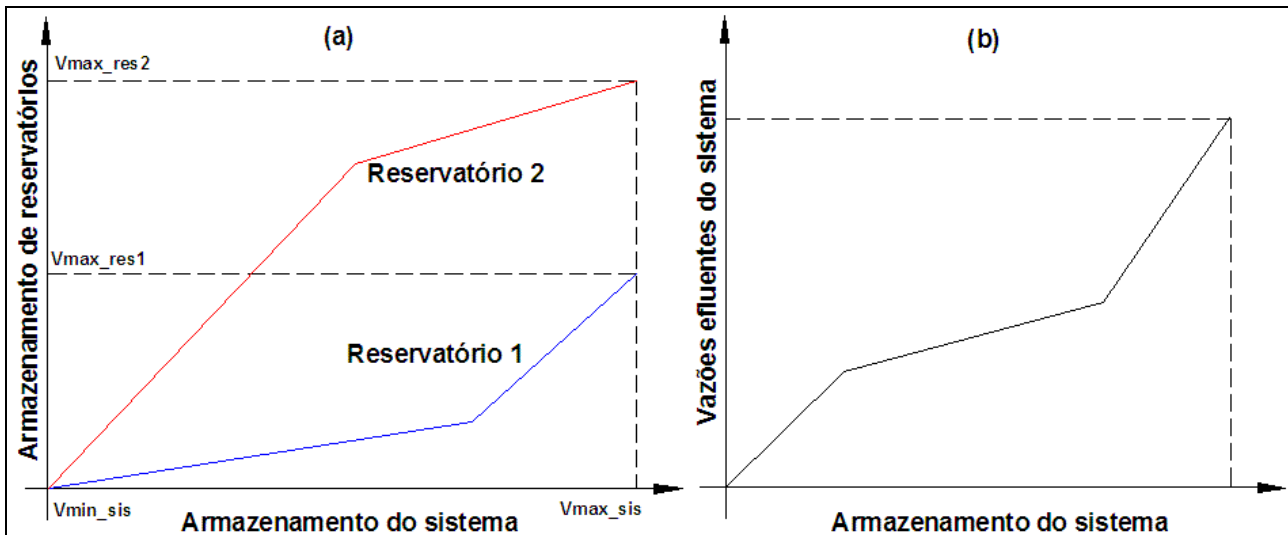


Figura 1: Exemplo de regras paramétricas de operação de um sistema de dois reservatórios.

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. Nesse sentido realizaram vários testes, demonstrando que na situação mais desfavorável, a técnica de parametrização, simulação e otimização obteve resultados 1,90% inferiores aos resultados obtidos com a melhor das outras duas técnicas. Enquanto que na maioria dos exercícios desenvolvidos o resultado foi praticamente igual. É importante ressaltar que a diferença no número das variáveis de decisão entre as diferentes abordagens foi significativa, favorecendo de forma ampla à utilização da parametrização.

A técnica de parametrização, simulação e otimização foi ainda utilizada 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, que definiam diferentes graus de racionamento no atendimento de uma demanda. A estratégia que permitiu ter sucesso nessas abordagens foi considerar algumas variáveis de decisão comuns entre as diferentes curvas-guia (figura 2). Dessa forma, apesar de ter curvas-guia múltiplas, o número de variáveis de decisão permaneceu reduzido.

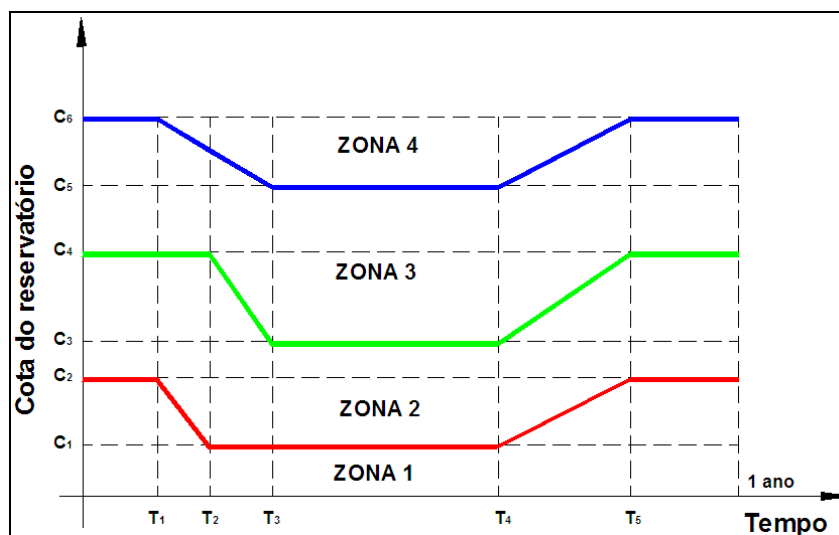


Figura 2: Exemplo de múltiplas curvas-guia parametrizadas (adaptado de Chen, 2003).

Finalmente, algoritmos evolutivos foram utilizados na otimização das regras de operação na maioria dos casos apresentados previamente.

O presente trabalho apresenta uma aplicação da técnica de parametrização, simulação e otimização para definir a regra de operação de um reservatório com dois usos conflitantes: geração de energia e controle de cheias.

3- CURVA-GUIA PARA CONTROLE DE CHEIAS E VOLUME DE ESPERA

Para atender esses dois objetivos, produção de energia e controle de cheias, o nível da água no reservatório é reduzido no início e durante o período chuvoso, para permitir amortecer vazões afluentes altas. Em função disso, ocorre uma redução da produção energética, se comparada ao cenário de maximização do nível da água no reservatório. 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 da 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 da 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 3.

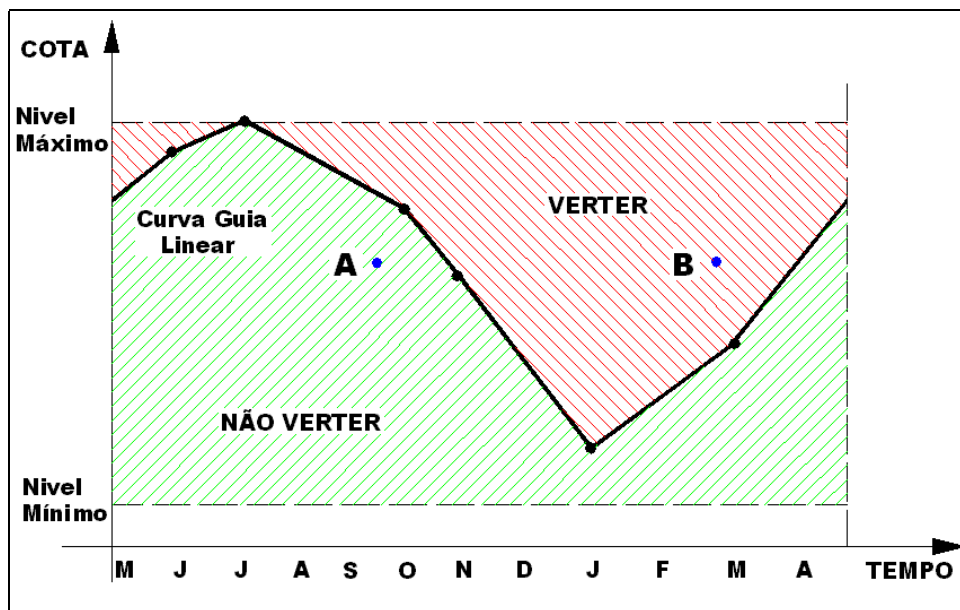


Figura 3: Exemplo de curva-guia com volume de espera variável durante o ano.

A operação definida pela curva-guia é diferente se o nível do reservatório se encontra na posição indicada por “A” ou “B” (figura 3) 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 afluentes favoráveis (vazões altas), o nível da água do reservatório segue a curva-guia. Com vazões afluentes desfavoráveis o nível da água fica abaixo da curva-guia.

4- METODOLOGIA

A metodologia utilizada é baseada em simulações matemáticas do balanço hídrico de um reservatório com dois usos conflitantes: a geração de energia e o controle de cheias. Fazem parte da metodologia os seguintes itens, cada um deles descrito separadamente no texto:

- 1) Modelo de balanço hídrico de um reservatório;
- 2) algoritmo de otimização da curva-guia para controle de cheias;

4.1- Modelo de balanço hídrico do reservatório

O modelo de balanço hídrico de um reservatório define a evolução do volume ou cota do reservatório, ao longo de um período de tempo, em função de um conjunto de variáveis. A figura 4 apresenta as principais variáveis intervenientes na operação de um reservatório.

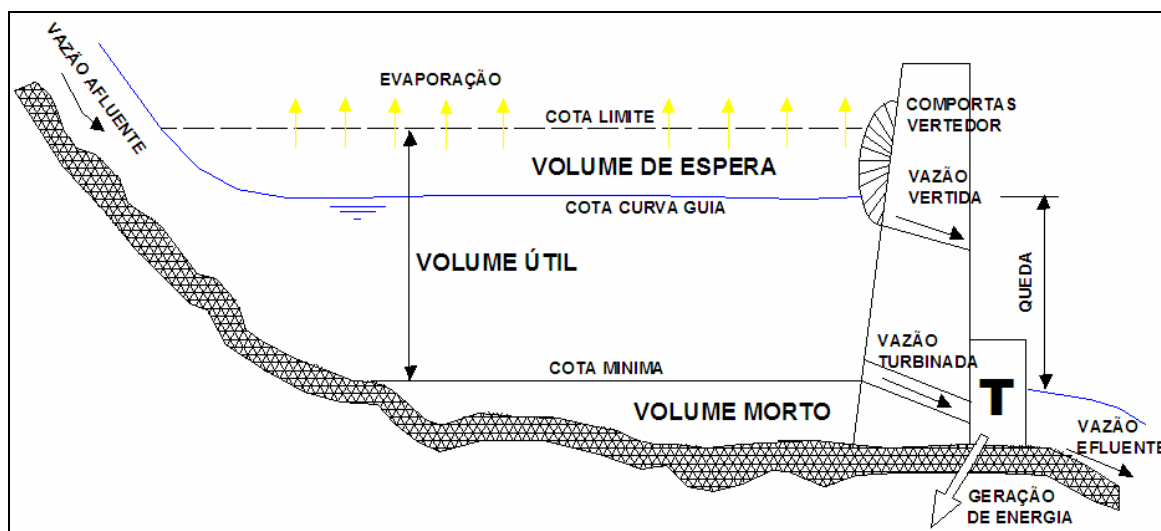


Figura 4: Principais variáveis intervenientes na operação de um reservatório.

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

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

Nesta equação t indica o intervalo de tempo anterior; $t+1$ indica o intervalo de tempo atual; V_{t+1} é o volume do reservatório em $t+1$ (hm^3); V_t é o volume do reservatório em t (hm^3); QA_t é a vazão afluente em t ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); QA_{t+1} é a vazão afluente em $t+1$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); QE_t é a vazão efluente em t ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); QE_{t+1} é a vazão efluente em $t+1$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); Δt é o intervalo de tempo (1 dia); E_{t+1} é a evaporação líquida diária no tempo $t+1$ (mm); A_t é a área do reservatório para um volume V_t (km^2).

A cada intervalo de tempo esta equação é resolvida para o termo V_{t+1} , considerando conhecidas as vazões afluentes (QA) nos tempos t e $t+1$, e considerando que há uma relação direta entre a vazão efluente e o volume armazenado (ou o nível da água no reservatório). Assim, o volume V_t define a vazão efluente QE_{t+1} e a vazão efluente 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 válida dado que foi utilizado, na operação, um intervalo de tempo diário, que é relativamente pequeno considerando o volume útil do reservatório em que foi feita a aplicação.

A vazão efluente total é dada pela soma da vazão turbinada e vertida, como definido na equação 2:

$$QE_{t+1} = QT_{t+1} + QV_{t+1} \quad (2)$$

onde QE_{t+1} é a vazão efluente em t+1 ($m^3 \cdot s^{-1}$); QT_{t+1} é a vazão turbinada em t+1 ($m^3 \cdot s^{-1}$) função da cota do reservatório em t e da curva de vazão turbinada; QV_{t+1} é a vazão vertida em t+1 ($m^3 \cdot s^{-1}$) função da cota do reservatório em t.

A aplicação da equação 1 recursivamente ao longo de toda a série de vazões afluentes observadas resulta numa série de volumes e níveis da água (H_t) correspondentes. Entretanto, uma das seguintes duas situações pode-se apresentar ao final de um intervalo de tempo: 1) o volume calculado V_{t+1} é tal que H_{t+1} correspondente é igual ou inferior à curva-guia; 2) o volume V_{t+1} é tal que H_{t+1} correspondente é superior à curva-guia.

No caso 1, a vazão de vertimento QV_{t+1} 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 da água é exatamente igual ao nível definido pela curva-guia. Para isto, o valor da vazão vertida é calculado de acordo com a 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 ($m^3 \cdot s^{-1}$); V_t é o volume do reservatório em t (hm^3); QA_t é a vazão afluente em t ($m^3 \cdot s^{-1}$); QA_{t+1} é a vazão afluente em t+1 ($m^3 \cdot s^{-1}$); QE_t é a vazão efluente em t ($m^3 \cdot s^{-1}$); Δt é o intervalo de tempo (1 dia); E_{t+1} é a evaporação líquida diária em t+1 (mm); A_t é a área do reservatório para um volume V_t (km^2); QT_{t+1} é a vazão turbinada em t+1 ($m^3 \cdot s^{-1}$); $V_{reg_{t+1}}$ é o volume indicado pela curva-guia em t+1 (hm^3).

As restrições operacionais consideradas para o controle de cheias incluem limites no valor máximo da vazão efluente para evitar inundações a jusante do reservatório e limites no nível da água do reservatório para evitar inundações a montante. Assim, nos casos em que a vazão vertida calculada pela equação 3 resulta em uma vazão efluente total superior ao limite imposto pela restrição de jusante (Q_{lim}), a vazão vertida é recalculada, limitando-se o seu valor para impedir que a vazão efluente total QE_{t+1} supere o limite Q_{lim} , como expresso na equação 4.

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

Nesse caso o nível da água no reservatório pode ficar superior ao nível definido pela curva-guia, mas a vazão efluente máxima não é superada. Isto significa que a restrição dada pelo limite de vazão a jusante da barragem é considerada mais importante do que a restrição que limita o nível da água no reservatório para evitar inundações na cidade de montante.

Para uma curva-guia pré-definida é possível simular a seqüência de volumes (em intervalo de tempo diário), níveis e vazões efluentes, utilizando os dados da série histórica de vazão afluente. Ao final da simulação o número de vezes em que é quebrada a restrição que limita o nível da 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 da 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.

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

onde Pot_t é a potência média gerada no dia t (MWmed); QT_t é a vazão turbinada ($m^3 \cdot s^{-1}$) em t ; H_t é a cota do nível da água do reservatório no dia t (m); H_{cf} é a cota do nível da água a jusante da barragem; $(H_t - H_{cf})$ é a queda no dia t (m); rend é o rendimento da central. Na aplicação dessa metodologia foi considerado um valor constante de H_{cf} igual a 518,0 m e um valor constante de rend igual a 0,873.

4.2- Algoritmo de otimização da curva-guia

Quando utilizada a técnica de parametrização, simulação e otimização, uma curva-guia é representada por segmentos de retas, considerando as coordenadas dos pontos extremos destes segmentos como as variáveis de otimização.

Na figura 5 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.

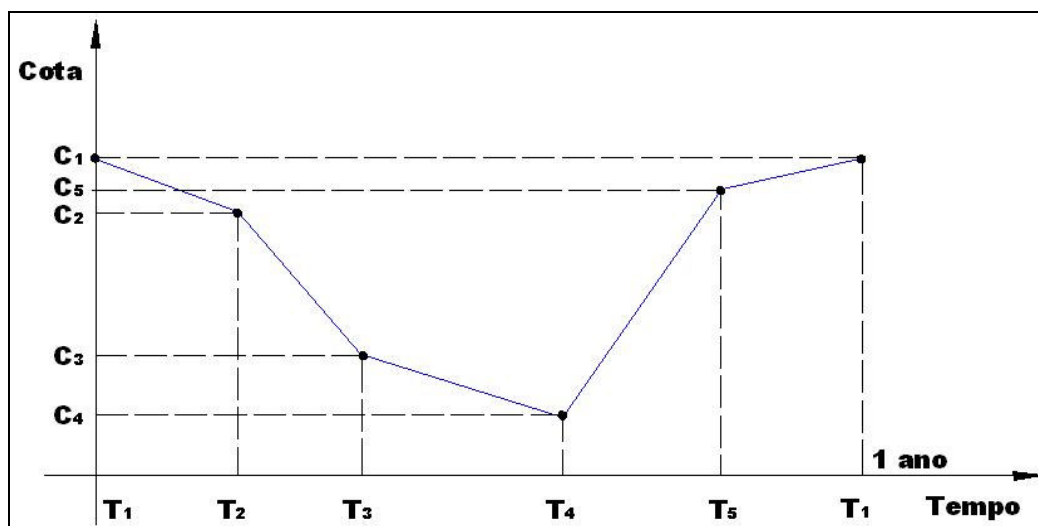


Figura 5: Curva-guia parametrizada, representada por segmentos de reta.

Uma curva-guia pode ser parametrizada com um número qualquer (n) de segmentos de reta, 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) 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.

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 de evolução de uma população, com características semelhantes a um algoritmo genético. Este algoritmo tem apresentado excelentes resultados na calibração automática de modelos hidrológicos [Duan et al. (1992); Sorooshian et al. (1993); Duan et al. (1994); Sorooshian e Gupta (1995); Gan e Biftu (1996); Collischonn e Tucci (2001); Abdulla et al. (1999); Diniz (1999); Thyer et al. (1999) e Madsen (2000)] 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, com conceitos de busca aleatória supervisionada, evolução competitiva e mistura complexa.

O algoritmo opera com 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”.

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. Quanto maior a população, maiores são as chances de encontrar o ótimo global, porém maior é o tempo de processamento e o número de iterações necessárias para a convergência do algoritmo. Maiores informações acerca do algoritmo SCE-UA podem ser encontradas em Duan et al. (1992) e Collischonn e Tucci (2001).

A função-objetivo utilizada neste trabalho é apresentada na equação 6. 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.

$$FO = \sum_{t=1}^N Pot_t - pen_t \quad (6)$$

onde Pot_t é a potência média gerada no dia t (MWmed – veja equação 5); 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 .

Na aplicação dessa metodologia, 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.

5- APLICAÇÃO

5.1- Dados do estudo de caso

Os dados utilizados neste trabalho correspondem ao reservatório de Três Marias, no rio São Francisco, em Minas Gerais. 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 6. Também é necessário evitar que o nível da 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.

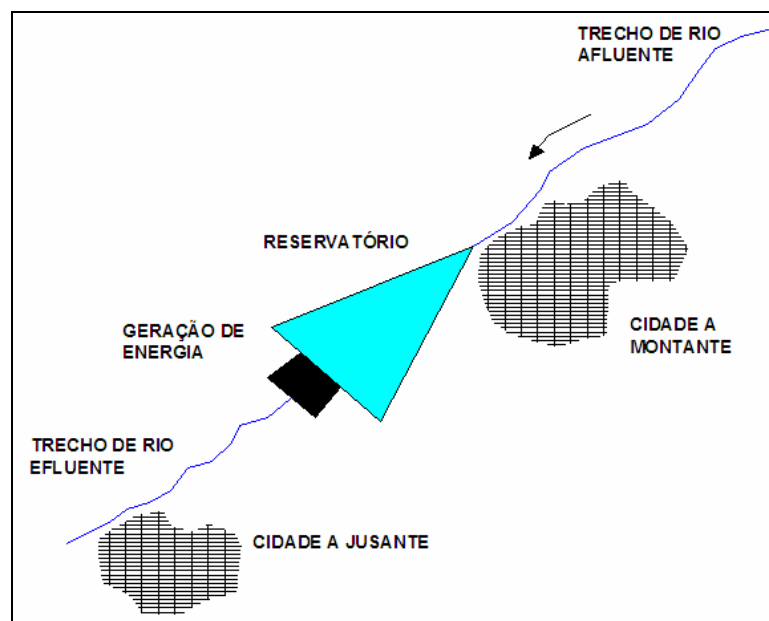


Figura 6: Esquema da configuração espacial do sistema analisado.

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.

5.1.1- Informações sobre a barragem e o reservatório

Neste item são apresentados os dados de características físicas e hidrológicas do reservatório de Três Marias utilizados neste trabalho.

A relação Cota-Área-Volume desse reservatório é apresentada na tabela 1. 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 a vazão média afluente durante um ano, configurando um reservatório com grande capacidade de regularização de vazão.

Tabela 1: Relação Cota-Área-Volume do reservatório de Três Marias.

Cota (m)	Área (km ²)	Volume (hm ³)
549,20	315,75	4250,00
549,96	416,92	6300,00
556,90	593,42	10100,00
562,86	788,38	14500,00
572,50	1009,32	19528,00

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. Para simplificar a representação da vazão turbinada adotou-se neste trabalho uma relação entre o nível da água no reservatório e a vazão turbinada, apresentada na figura 7. Esta relação foi baseada nos dados de potência máxima, queda, número de turbinas e vazão máxima de engolimento.

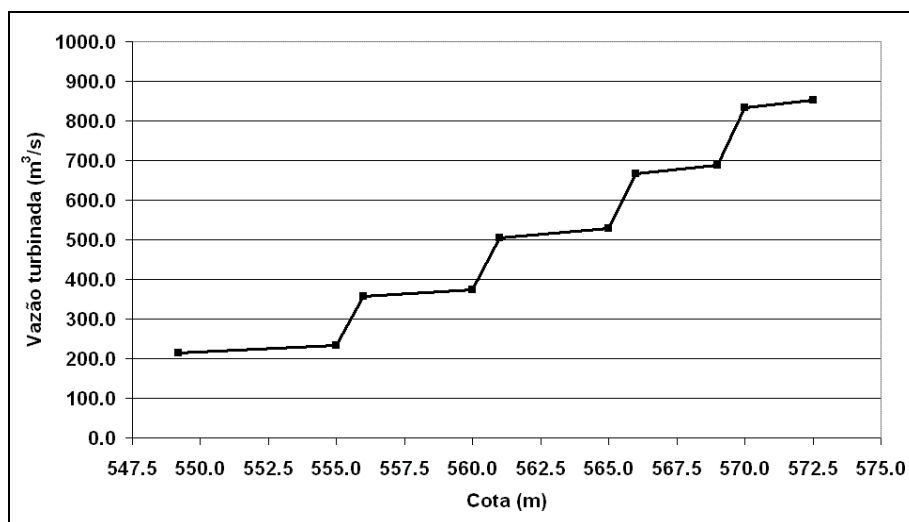


Figura 7: Curva de vazão turbinada adotada neste trabalho.

5.1.2- 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 8). A série corresponde a um período de 34 anos que inicia em janeiro de 1931 e finaliza em setembro de 1964.

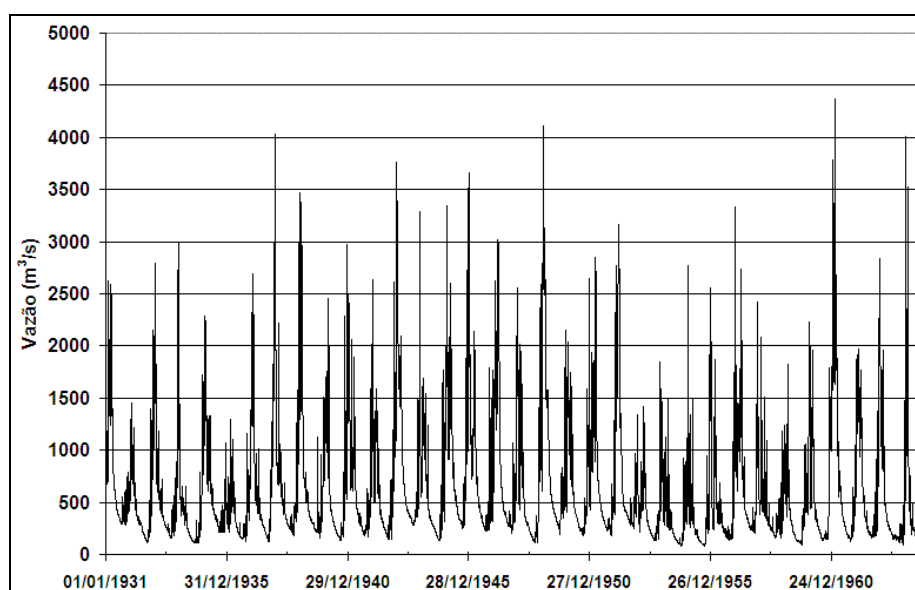


Figura 8: Vazões médias diárias afluentes ao reservatório de Três Marias, no período de 1931 a 1964.

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 mês de maio. A vazão afluente varia entre valores próximos a $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, no período de estiagem, a valores tipicamente superiores a $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ no período de verão.

5.1.3- Restrições de operação

No caso analisado neste trabalho foram consideradas três restrições de operação. A primeira refere-se ao nível da água no reservatório a partir do qual começam as inundações na cidade de montante, limitado a 572,50m. A segunda restrição refere-se ao valor máximo da vazão efluente total (Q_{lim}), limitado a $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Além disso, a vazão efluente deve respeitar uma restrição que limita a sua variação de um dia para o próximo. Assim, por exemplo, para vazões inferiores a $2500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, o máximo incremento da vazão efluente entre um dia e o próximo é de $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; e para vazões entre $2500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, o máximo incremento da vazão efluente entre um dia e o próximo é de $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Todos esses valores refletem de forma muito aproximada as restrições de operação existentes no reservatório de Três Marias.

5.2- Discretização da curva-guia

Nas diferentes avaliações que foram realizadas mais adiante no texto foram otimizadas curvas-guia com diferentes graus de discretização. Nesse sentido, este item apresenta as datas pré-definidas dos extremos dos segmentos de reta utilizadas para definir os pontos de quebre da curva-guia. A escolha dessas datas foi feita levando em consideração a sazonalidade existente no estudo de caso e assim, foram escolhidas datas só dentro do período chuvoso. As datas pré-definidas são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2: Valores das cotas correspondentes aos limites, inferior e superior, do intervalo de busca das variáveis de decisão a serem otimizadas.

Data	Cota limite inferior (m)	Cota limite superior (m)
15/05	559,00	572,45
11/12	559,00	572,45
14/02	559,00	572,45
16/03	559,00	572,45
15/01	559,00	572,45
15/04	559,00	572,45
01/03	559,00	572,45
31/03	559,00	572,45
30/04	559,00	572,45
30/05	559,00	572,45

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 2 e a figura 9.

No caso da representação da curva-guia com um segmento de reta não são utilizadas datas pré-definidas já que o mesmo valor da cota otimizada vai ser mantido durante todo o ano. Para maiores números de segmentos, as datas apresentadas na tabela 2 foram utilizadas da seguinte forma: quando a curva-guia é representada por dois segmentos de retas, são otimizadas as cotas das duas primeiras datas pré-definidas apresentadas na tabela 2, quando a curva-guia é representada por três segmentos de retas, são otimizadas as cotas das três primeiras datas pré-definidas apresentadas na tabela 2, e assim sucessivamente.

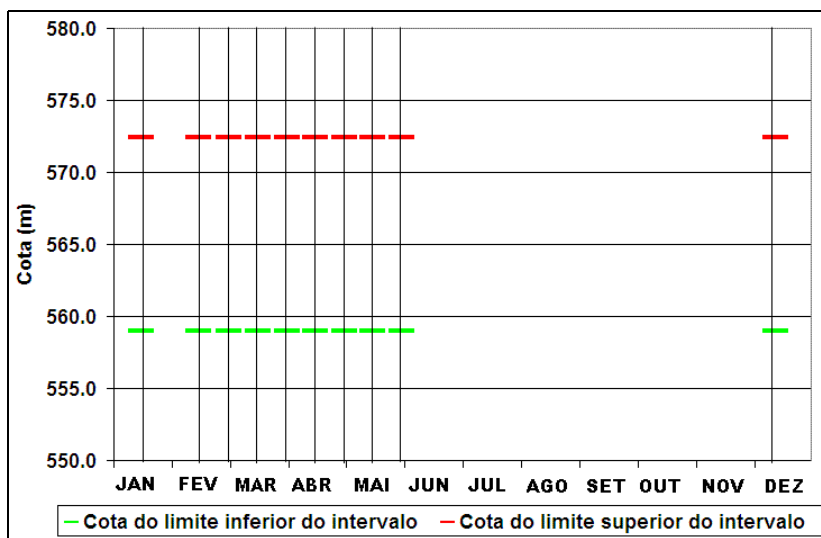


Figura 9: Esquema de datas e cotas para otimização dos pontos de quebra da curva-guia considerando dez segmentos de retas.

5.3- Verificação da aplicabilidade do algoritmo SCE-UA

Embora não exista garantia de que o valor ótimo encontrado por um algoritmo evolutivo de otimização, como o SCE-UA, seja o ótimo global, o fato de encontrar o mesmo valor ótimo da função-objetivo em diferentes processos de otimização com valores crescentes de indivíduos na população e diferentes soluções aleatórias iniciais, faz acreditar que o valor encontrado é realmente o ótimo global.

A avaliação da aplicabilidade do algoritmo SCE-UA na determinação de regras de operação “ótimas” foi feita em termos de eficiência e eficácia na resolução do problema de otimização. Uma medida da eficiência de um algoritmo evolutivo de otimização é o número de iterações necessárias para sua convergência. Quanto menor seja esse número, maior será sua eficiência. Por sua vez, uma forma de avaliar a eficácia de um algoritmo evolutivo de otimização é através do número de “falhas” em encontrar o ótimo global em diferentes inícios do processo de otimização. Quanto maior esse número, menor sua eficácia.

Assim, quanto maior o número de indivíduos na população, menores as probabilidades de falha em encontrar o ótimo global (maior eficácia), porém maior é o número de iterações necessárias para atingir a convergência do algoritmo (menor eficiência).

Numa primeira análise, foi avaliado o número necessário de indivíduos na população para obter uma baixa probabilidade de falha em encontrar o ótimo global e o valor correspondente de eficiência esperada.

Com o objetivo de avaliar a eficiência e eficácia do algoritmo SCE-UA na determinação da curva-guia ótima foram realizados 25 processos independentes de otimização utilizando um número crescente de indivíduos na população. Essa verificação foi realizada considerando uma discretização da curva-guia através de seis, oito e dez variáveis de decisão (cotas dos extremos dos segmentos de reta).

Na figura 10 são apresentados os resultados obtidos na otimização da curva-guia considerando seis variáveis de decisão. No eixo de ordenadas é apresentada a probabilidade de falha em encontrar o ótimo global do problema nos 25 processos independentes de otimização realizados para cada número de indivíduos na população indicado nessa figura. Dessa forma, no eixo de ordenadas é apresentada uma medida da eficácia do algoritmo. Por sua vez, no eixo de abscissa é apresentado o número médio de iterações necessárias para a convergência do algoritmo em cada processo de otimização, o qual representa uma medida da eficiência do algoritmo.

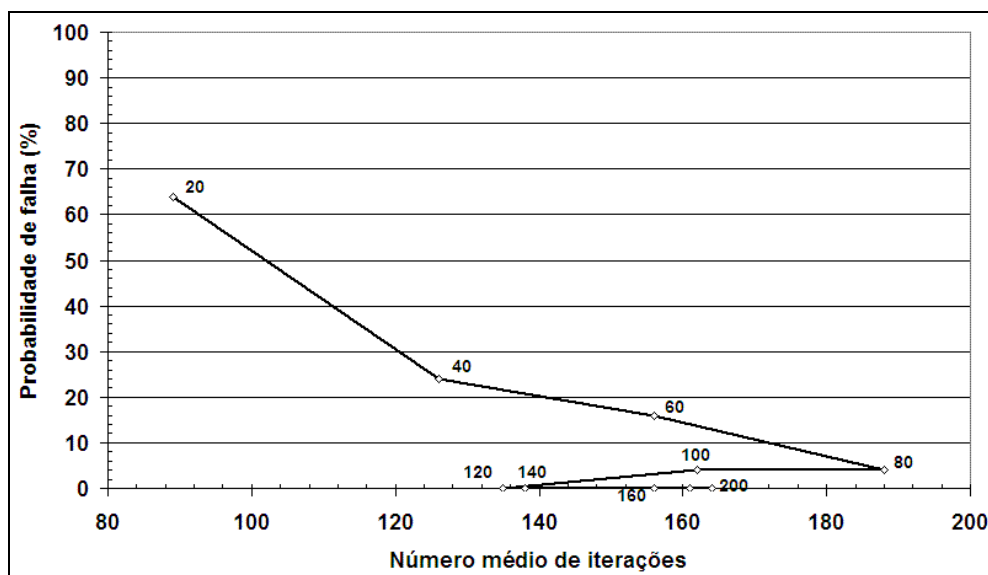


Figura 10: Eficiência versus eficácia do algoritmo SCE-UA em função do número crescente de indivíduos na população. Seis variáveis de decisão.

A figura 11 apresenta uma comparação dos resultados obtidos considerando 6, 8 e 10 variáveis de decisão, sendo utilizados um número crescente de indivíduos na população inicial. O número de indivíduos utilizado variou-se de 20 a 200 (com incrementos de 20 em 20) quando

utilizadas 6 e 8 variáveis de decisão. Entretanto, quando utilizadas 10 variáveis de decisão, o número de indivíduos variou-se de 25 a 250 (com incrementos de 25 em 25). Cada incremento de indivíduos na população representa um complexo mais sendo utilizado. Assim, por exemplo, quando a população teve apenas 20 indivíduos, significa que foi utilizado um complexo. Entretanto, quando foram utilizados 200 indivíduos na população, significa que foram utilizados 10 complexos.

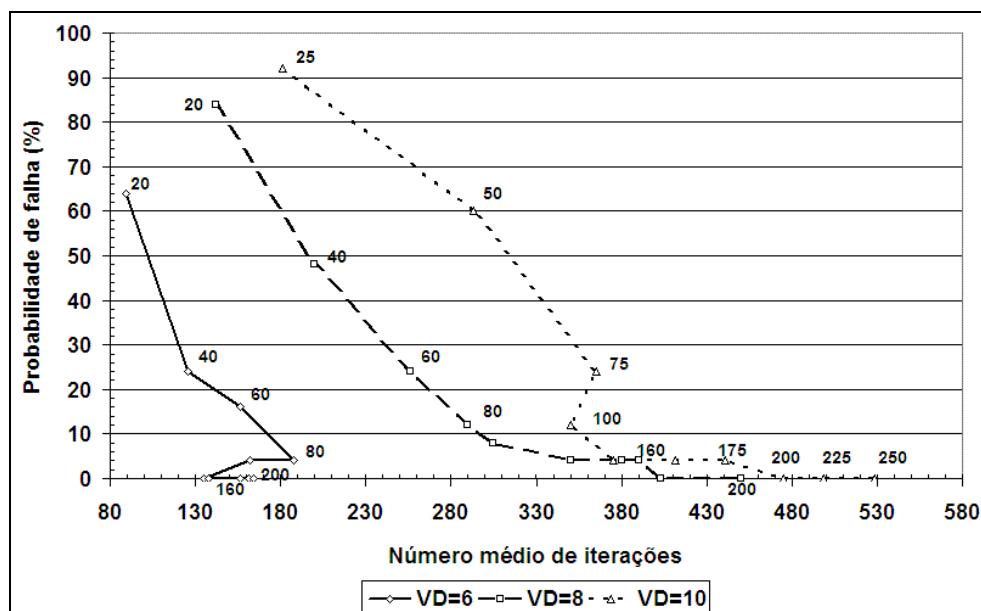


Figura 11: Eficiência versus eficácia do algoritmo SCE-UA em função do número crescente indivíduos na população. Comparação entre os resultados utilizando um número diferente de variáveis de decisão.

Observa-se na figura 11 que a eficiência do algoritmo SCE-UA diminui quando utilizado um número maior de variáveis de decisão, como era esperado. Na otimização da curva-guia com dez variáveis de decisão foi necessário de um número maior de indivíduos por complexo para satisfazer os valores recomendados pelos autores que desenvolveram o algoritmo SCE-UA. Dessa forma, o número médio de iterações necessárias para alcançar a convergência do algoritmo foi maior que no caso com oito e seis variáveis de decisão.

A eficácia do algoritmo SCE-UA também foi inferior quando utilizado um número maior de variáveis de decisão. Porém, a diferença de eficácia diminuiu na medida em que foi utilizado um maior número de complexos. Já a partir de sete complexos a eficácia foi praticamente a mesma, não existindo falhas em encontrar o ótimo global do problema analisado nos 25 diferentes processos de otimização realizados.

Apesar de existir diferenças nos valores de eficiência e eficácia do algoritmo SCE-UA em função do número de variáveis de decisão, os resultados obtidos mostram que a utilização de um número não menor a 140 indivíduos na população é suficiente para ter uma baixa probabilidade de falha em encontrar o ótimo global.

Quando utilizados seis segmentos para descrever a curva-guia foram necessários 140 indivíduos na população e 150 iterações, na média, para atingir a convergência do algoritmo com uma baixa probabilidade de falha em encontrar o ótimo global do problema. Por sua vez, quando utilizados dez segmentos para descrever a curva-guia foram necessários 200 indivíduos na população e 480 iterações, na média, para atingir a convergência do algoritmo com uma baixa probabilidade de falha em encontrar o ótimo global do problema. Ambas as características confirmam a aplicabilidade do algoritmo SCE-UA neste problema de otimização.

5.4- Avaliação do grau de discretização da curva-guia

Numa segunda análise, foi avaliado o número de segmentos de reta necessário para uma boa descrição da curva-guia. Nesse sentido, foram iniciados vários processos de otimização utilizando uma população de 200 indivíduos.

O procedimento utilizado consistiu na realização de vários processos de otimização mudando o número de variáveis de decisão (cotas dos extremos dos segmentos de reta) de um a dez, e sendo analisada a mudança no valor do ótimo da função-objetivo.

A figura 12 apresenta os resultados obtidos em termos do valor ótimo da função-objetivo conforme foi aumentado o número de segmentos de reta utilizados para descrever a curva-guia. Essa figura mostra de forma clara a influência que o grau de discretização da curva-guia tem no valor do ótimo da função-objetivo. Assim, se observa na figura 12 que os resultados obtidos quando utilizada apenas uma variável de decisão para descrever a curva-guia otimizada são 3% inferiores a aqueles obtidos com dez variáveis de decisão.

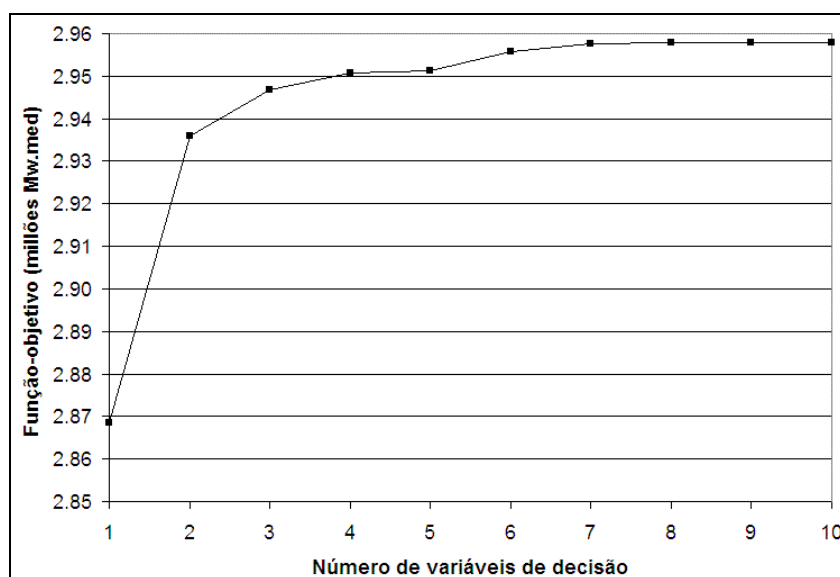


Figura 12: Incremento no valor ótimo da função-objetivo em função do número de variáveis de decisão (cotas dos extremos dos segmentos de reta) otimizadas.

Ainda é importante ressaltar que, no caso de estudo, o incremento no valor ótimo da função-objetivo é totalmente desprezível se utilizadas dez variáveis de decisão em lugar de seis (existe um incremento inferior a 0,07%). Dessa forma, com a utilização de seis variáveis de decisão pode ser obtida uma boa descrição da curva-guia ótima.

Na figura 13 são apresentadas as diferentes curvas-guia otimizadas utilizando a técnica de parametrização, simulação e otimização. Nessa figura são apresentadas as três curvas-guia otimizadas obtidas considerando três, seis e dez variáveis de decisão (cotas dos extremos dos segmentos de reta).

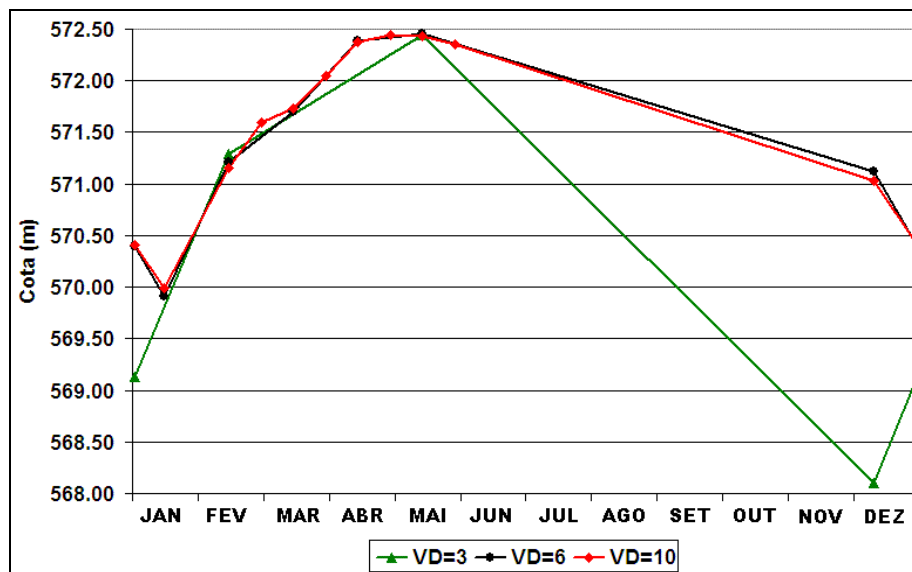


Figura 13: Curvas-guia otimizadas em função de diferentes graus de discretização, a linha verde representa a curva-guia otimizada com base a três variáveis de decisão, a linha preta representa a curva-guia otimizada com base a seis variáveis de decisão e a linha vermelha representa a curva-guia otimizada com base a dez variáveis de decisão.

7- CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para definir uma regra de operação ótima num reservatório com dois usos conflitantes: geração de energia e controle de cheias. A metodologia considera a simulação do balanço hídrico do reservatório, combinado à simulação de regras de operação.

Regras de operação simples, na forma de curvas-guia lineares, foram utilizadas para a operação. As curvas-guia foram otimizadas através de uma técnica de parametrização, simulação e otimização utilizando o algoritmo SCE-UA. A metodologia apresentada foi aplicada, neste trabalho, considerando um intervalo de tempo diário na simulação da operação do reservatório. Porém, pode ser aplicada considerando um intervalo de tempo horário ou semanal.

A aplicabilidade do algoritmo SCE-UA foi ainda avaliada em termos de eficiência e eficácia. Os resultados obtidos mostraram que o uso de seis ou mais segmentos de retas são suficientes para obter uma boa descrição da curva-guia no caso estudado. Quando utilizados seis segmentos para descrever a curva-guia foram necessários 140 indivíduos na população e 150 iterações, na média, para atingir a convergência do algoritmo com uma baixa probabilidade de falha em encontrar o ótimo global do problema. Por sua vez, quando utilizados dez segmentos para descrever a curva-guia foram necessários 200 indivíduos na população e 480 iterações, na média, para atingir a convergência do algoritmo com uma baixa probabilidade de falha em encontrar o ótimo global do problema. Esses valores mostram que o algoritmo SCE-UA apresentou eficácia e eficiência na resolução do problema de otimização.

Os resultados obtidos neste trabalho confirmaram a validade da metodologia desenvolvida e a aplicabilidade do algoritmo SCE-UA na determinação de regras de operação ótimas por médio da técnica de parametrização, simulação e otimização.

BIBLIOGRAFIA

- ABDULLA, F. A.; LETTENMAIER, D. P.; LIANG, X. (1999). “*Estimation of the ARNO model baseflow parameters using daily streamflow data*”. *Journal of Hydrology* (222), pp. 37-54.
- BRAVO, J. M. (2006). “*Otimização da operação de um reservatório com base na previsão de vazão*”. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 134 pp.
- CHANG, F-J; CHEN, L.; CHANG, L-C. (2005). “*Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms*”. *Hydrological Processes* (19), pp. 2277-2289.
- CHEN, L. (2003). “*Real coded genetic algorithm optimization of long term reservoir operation*”. *Journal of the American Water Resources Association* (39-5), pp. 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, pp. 151-164.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. (1992). “*Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models*”. *Water Resources Research* (28-4), pp. 1015-1031.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. (1994). “*Optimal use of the SCE – UA global optimization method for calibrating watershed models*”. *Journal of Hydrology* (158), pp. 265-284.
- GAN, T. Y.; BIFTU, G. F. (1996). “*Automatic calibration of conceptual rainfall – runoff models: optimization algorithms, catchment conditions and model structure*”. *Water Resources Research* (32-12), pp. 3513-3524.

- 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), pp. 945-958.
- LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A. (1981). “*Water resource systems planning and analysis*”. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 559 pp.
- MADSEN, H. (2000). “*Automatic calibration of a conceptual rainfall – runoff model using multiple objectives*”. *Journal of Hydrology* (235), pp. 276-288.
- MAYS, L. W.; TUNG, Y-K. (1992). “*Hydrosystems engineering and management*”. McGraw-Hill Inc., New York, 530 pp.
- NALBANTIS, I.; KOUTSOYIANNIS, D. (1997). “*A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems*”. *Water Resources Research* (33-9), pp. 2165-2177.
- OLIVEIRA, R.; LOUCKS, D. P. (1997). “*Operating rules for multireservoir systems*”. *Water Resources Research* (33-4), pp. 839-852.
- ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. “*Plano Anual de Prevenção de Cheias – Ciclo 2000/2001*”. Rio de Janeiro, jan. 2001, 110 pp.
- SOROOSHIAN, S.; DUAN, Q.; GUPTA, V. (1993). “*Calibration of rainfall – runoff models: Application of global optimization to the Sacramento soil moisture accounting model*”. *Water Resources Research* (29-4), pp. 1185-1194.
- SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. (1995). “*Model calibration, in Computer models of watershed hydrology*”. SINGH, V. J. (editor). *Water Resources Publications*, Highlands Ranch.
- THYER, M.; KUCZERA, G.; BATES, B. C. (1999). “*Probabilistic optimization for conceptual rainfall – runoff models: A comparison of the shuffled complex evolution and simulated annealing algorithms*”. *Water Resources Research* (35-3), pp. 767-773.
- 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), pp. 649-657.
- WURBS, R. A. (1996). “*Modeling and analysis of reservoir system operations*”. Prentice-Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 356 p.