

Operação de Múltiplos Reservatórios Destinados à Geração Hidrelétrica Utilizando uma Estratégia Híbrida de Otimização

Luiz Sérgio Vasconcelos do Nascimento

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

luizsergiovn@gmail.com

Luisa Fernanda Ribeiro Reis

Departamento de Hidráulica e Saneamento – EESC – USP.

fernanda@sc.usp.br

Recebido: 19/11/07 - revisado: 09/04/09 - aceito: 13/10/09

RESUMO

Uma das importantes aplicações da análise de sistemas no planejamento de recursos hídricos diz respeito à determinação de estratégias operacionais para sistemas de múltiplos reservatórios, elementos indispensáveis aos aproveitamentos hídricos, cuja operação é alvo de análises que podem envolver muitas restrições e variáveis de decisão. Fica evidenciada, portanto, a necessidade de a operação destes ser otimizada, propiciando assim, o seu melhor aproveitamento, com o menor custo para a sociedade. O presente trabalho apresenta um estudo da operação otimizada de um sistema de reservatórios destinado à geração de energia elétrica, usando um modelo de otimização composto de algoritmos genéticos e o SIMPLEX de Nelder e Mead, acoplado à Programação Linear Sucessiva. Em conformidade com a proposta de Reis et al. (2005), o problema de otimização é resolvido através da decomposição em subproblemas sequenciais independentes relativos a cada estágio de operação, conectados entre si por supor que os volumes dos reservatórios no final de cada estágio correspondam ao estado do sistema no início do estágio subsequente. Para estimular a utilização mais eficiente dos volumes armazenados, no suprimento das demandas hídricas dos estágios futuros, são aplicados FRCs (fatores de redução de custo) sobre os volumes armazenados remanescentes no final de cada estágio. Um estudo é realizado para o sistema de reservatórios do rio São Francisco, cujos resultados aqui reportados mostram-se promissores.

Palavras Chave: Otimização; sistema de reservatórios; algoritmo genético; programação linear sucessiva.

INTRODUÇÃO

A engenharia de recursos hídricos tem como objetivo promover mudanças qualitativas e quantitativas no sentido de adequar as disponibilidades de água aos padrões de demanda hídrica correspondentes. A grande dificuldade encontrada é referente à complexidade das decisões envolvidas, devido às diferentes possibilidades de projeto e operação dos sistemas, à variabilidade das disponibilidades e demandas de natureza estocástica, bem como ao confronto de interesses conflitantes dos múltiplos usos.

O planejamento de recursos hídricos tem sido amplamente estudado, principalmente no que diz respeito à determinação de regras de operação de sistemas hídricos, em busca de políticas opera-

cionais cada vez mais eficientes no uso e alocação da água.

A adoção de técnicas de análise de sistemas no planejamento e gerenciamento de sistemas hídricos representa um grande avanço na engenharia de recursos hídricos. Tais técnicas devem desempenhar papel importante no projeto e na operação de sistemas complexos, pois não se deve dimensionar ou operar sistemas sem que parâmetros técnicos, econômicos, ou de outra natureza tenham norteados a decisão.

A escolha da técnica a ser utilizada depende do horizonte de planejamento, das características do sistema considerado, da avaliação dos dados e dos objetivos e restrições existentes.

Pereira & Pinto (1985) estabelecem que o objetivo da operação otimizada de reservatórios é encontrar estratégias de operação para cada estágio

do período de planejamento, de acordo com o estado inicial do sistema. Tais autores afirmam que a operação ótima de um sistema de reservatórios é caracterizada pela dependência entre a decisão tomada em um dado estágio do horizonte de planejamento e as futuras conseqüências desta decisão. Características como a existência de múltiplos reservatórios interconectados e a necessidade de otimização para um horizonte de operação extenso, aliadas às não-linearidades inerentes a tais sistemas, tornam os respectivos problemas complexos. Assim, diversas aproximações para a resolução do problema vêm sendo apresentadas na literatura, envolvendo a simplificação do sistema físico real, tratamento determinístico, etc.

Segundo Simonovic (1992), independente do caso em estudo, para a resolução de problemas envolvendo reservatórios, as relações entre as afluências, capacidade de armazenamento, vazão regularizável e garantia de regularização da operação dos reservatórios devem ser encontradas.

Labadie (2004) afirma que a otimização da operação de reservatórios deve incluir medidas de desempenho dos sistemas, tais como a eficiência (maximização de um benefício ou minimização de um prejuízo), a sobrevivência (respeito aos limites impostos que proporcionem uma subsistência mínima) e a sustentabilidade (continuidade dos aspectos econômicos, sociais, culturais e ambientais da sociedade humana).

Muitos modelos e algoritmos matemáticos destinados à operação de reservatórios já foram desenvolvidos e apresentados na literatura com extensas revisões publicadas por Yeh (1985), Siminovic (1992), Wurbs (1993), Labadie (2004), Lima e Lana (2005), Bravo *et al.* (2005) entre outros.

Recentemente, algoritmos evolucionários tais como os algoritmos genéticos (AGs) têm se mostrado muito eficientes na resolução de problemas desta natureza. Oliveira e Loucks (1997) estimaram regras de operação para um sistema de múltiplos reservatórios utilizando AGs. Orero e Irving (1998) também utilizaram AGs para o planejamento da operação horária de um sistema de reservatórios em cascata destinado à geração de energia elétrica, com a consideração acerca de todas as não-linearidades do problema. Wardlaw e Sharif (2000) exploraram o potencial de implementações alternativas de AGs para o problema da operação de quatro reservatórios com uma abordagem determinística em um horizonte finito. Cai *et al.* (2001) combinou os AGs com a programação linear para otimizar um sistema cinco de reservatórios destinados à geração de energia elétrica e ao abastecimento d'água. Reis &

Akutsu (2002) aplicaram AGs a um sistema hipotético de quatro reservatórios, considerando o estado inicial do sistema conhecido com uma atenção especial à ordem de grandeza dos pesos associados às restrições do problema e à influência dos volumes armazenados inicialmente nos reservatórios. Celeste *et al.* (2003) aplicaram um modelo de otimização baseado em AGs para determinar a alocação hídrica ótima de um sistema de recursos hídricos, em tempo real, sujeito a usos múltiplos e responsável pelo abastecimento d'água da cidade de Matsuyama, localizada no Japão. Tospornsampan *et al.* (2005) aplicaram os AGs combinados com a programação dinâmica diferencial discreta para otimizar a operação de um sistema de múltiplos reservatórios. Nascimento *et al.* (2007) utilizaram uma abordagem multi-objetivo com algoritmos evolucionários para a otimização da operação do sistema de reservatórios do rio São Francisco. Jothiprakash e Shanthi (2009) compararam a otimização de um sistema de reservatórios utilizando AGs e Programação Dinâmica Estocástica, utilizando como objetivo os desvios quadráticos das liberações e dos volumes desejados.

Os algoritmos evolucionários, dentre eles os AGs, possuem algumas vantagens em relação às técnicas clássicas de otimização, como a utilização de informações diretas acerca da função objetivo, não havendo a necessidade da determinação de derivadas. Outra vantagem apresentada pelos algoritmos evolucionários é o fato destes trabalharem com população de soluções, o que possibilita uma avaliação mais abrangente do espaço de busca a cada iteração. Os algoritmos evolucionários trabalham com população de soluções aleatórias e operadores estocásticos, o que possibilita uma maior capacidade de "fuga" de ótimos locais, além de manter uma maior diversidade da população.

Face ao exposto, o presente artigo enfoca o problema da operação de sistemas de reservatórios, aplicando e propondo modificações no método proposto por Reis *et al.* (2005), cujas vantagens incluem a possibilidade de representação detalhada do sistema em estudo e a obtenção de parâmetros úteis à sua operação futura. Esta pesquisa busca contribuir para o aprimoramento da operação ótima de sistemas de reservatórios, pois alia as vantagens do referido método ao emprego da Programação Linear Sucessiva para dar tratamento às não-linearidades do problema além de uma hibridização com o algoritmo de busca local proposto por Nelder e Mead (1965). Apresentam-se resultados de um estudo realizado aplicado ao sistema de reservatório da bacia do rio São Francisco.

A OPERAÇÃO ÓTIMA DE RESERVATÓRIOS

Estratégias operacionais para sistemas de reservatórios podem ser obtidas com base em modelos de simulação e/ou em modelos de otimização, neste último caso, visando maximizar os benefícios ou minimizar os prejuízos oriundos da operação durante o período de planejamento, de acordo com o passo temporal adotado (horário, semanal, mensal, etc.).

No caso dos modelos de otimização, os valores ótimos das variáveis de decisão são identificados, respeitando-se todas as restrições do problema, sejam elas físicas, operacionais ou de outra natureza. As equações de balanço hídrico, também conhecidas como equações de estado do sistema, e os limites de capacidade dos reservatórios, constituem restrições típicas do problema de operação de sistemas de reservatórios.

As principais funções objetivo associadas à otimização da operação de reservatórios podem ser formuladas como a busca da maximização dos benefícios do sistema, minimização dos desvios quadráticos em relação a uma curva guia de operação, minimização dos desvios quadráticos em relação a uma curva de demanda, ou ainda, minimização das perdas hídricas.

O problema de otimização da operação de um sistema de reservatórios para a geração de energia elétrica pode ser formulado como de maximização da energia elétrica do sistema no período analisado. Matematicamente, o problema pode ser proposto da seguinte forma:

Função Objetivo:

Maximizar

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [\rho_t(i) \cdot Vt_t(i)] \quad (1)$$

Variáveis de Decisão: Vt

Restrições do problema:

$$V_{t+1}^{(i)} = V_t^{(i)} + Va_t^{(i)} - Vt_t^{(i)} - Vv^{(i)} - Ev_t^{(i)} \cdot \frac{A_t^{(i)} + A_{t+1}^{(i)}}{2} + \sum_{j \in M} [Vt_t^{(j)} + Vv_t^{(j)}] \quad (2)$$

$$V_{\min}^{(i)} \leq V_{t+1}^{(i)} \leq V_{\max}^{(i)} \quad (3)$$

$$Vt_t^{(i)} \leq Vt_{\max} \quad (4)$$

$$Vt_t^{(i)} \geq 0 \quad (5)$$

em que V = volume armazenado no reservatório; Va = volume natural afluente ao reservatório; Vt = volume turbinado pelo reservatório; Vv = volume vertido pelo reservatório; A = Área superficial do espelho d'água do reservatório; Ev = Lâmina d'água evaporada a partir da superfície; t = Índice que representa a discretização temporal; i = Índice que representa os reservatórios do sistema; M_i = Conjunto de reservatórios imediatamente a montante do reservatório i ; N = Número de reservatórios do sistema, T = Final do período estudado e ρ = Característica de geração das turbinas do sistema;

Observa-se que tanto a função objetivo como as restrições apresentam não-linearidades. A geração de energia é função não-linear da vazão defluente e a evaporação é função não-linear do volume armazenado pelo reservatório. Para a otimização da operação do sistema de reservatórios, Reis *et al.* (2005) apresentaram uma aproximação estocástica alternativa ao método de decomposição de Benders proposto por Pereira e Pinto (1985), com a utilização dos Algoritmos Genéticos e Programação Linear.

A proposta sugere a resolução do problema de otimização do sistema de reservatórios assumindo a otimização de subproblemas seqüenciais independentes relativos a cada estágio de operação, conectados entre si por supor que os volumes dos reservatórios no final de cada estágio correspondam ao estado do sistema no início do estágio subsequente. A otimização desses subproblemas foi feita através da Programação Linear.

Para estimular a utilização mais eficiente dos volumes armazenados, no suprimento das demandas hídricas dos estágios futuros, são aplicados FRCs (fatores de redução de custo) sobre os volumes armazenados remanescentes no final de cada estágio e introduzidos na forma de penalidades negativas (incentivos) na função objetivo dos problemas seriados de PL. Esses FRCs, determinados via algoritmos genéticos, são vetores de pesos que variam de acordo com a sazonalidade (período do ano) e o reservatório considerado.

Esses dois passos de otimização, desenvolvidos através da hibridização de PL e AG, foram necessários para a obtenção dos valores mais adequados para os pesos em questão.

Na proposta original de Reis *et al.* (2005), os problemas seriados de otimização para cada estágio consistiam na minimização do importe hídrico ne-

cessário ao sistema, acrescido da função “estímulo” à manutenção do armazenamento nos reservatórios. No presente trabalho, os problemas seriados consistem na maximização da energia gerada pelo sistema em cada estágio, também acrescido da função “estímulo” à manutenção do armazenamento nos reservatórios, formulada da seguinte forma:

$$\text{Maximizar } \sum_{i=1}^N [\rho_t^{(i)} \cdot V_{t+1}^{(i)}] + \text{FRC}_t^T \cdot V_{t+1}^{(i)} \quad (6)$$

Sujeito às mesmas restrições apresentadas pelas equações (2) a (5).

$$\text{sendo: } \text{FRC}_t = \begin{bmatrix} G \cdot w_t \cdot w_{NT+1} \\ G \cdot w_t \cdot w_{NT+2} \\ \dots \\ G \cdot w_t \cdot w_{NT+N} \end{bmatrix}$$

FRC_t = vetor de fatores de redução de custo para o período t ; w_j = peso associado ao período t , correspondente ao mês j ; w_{NT+i} = peso associado ao reservatório i ; NT = o número de intervalos de tempo considerados, representando o horizonte de planejamento. G é uma constante multiplicadora necessária para correção da ordem de grandeza dos coeficientes da função “estímulo”.

Os pesos (w) tiveram uma faixa de variação definida pelos autores entre 0 e 1. Por este motivo, fez-se necessário o uso da constante multiplicadora G .

Uma vez conhecidos os valores dos FRCs, a decisão do problema consiste na determinação das variáveis de decisão operacionais (vazões turbinadas) propriamente ditas, através da resolução de sucessivos problemas de PL, ao longo de estruturas que podem representar possibilidades em termos das afluências naturais futuras.

Reis *et al.* (2005) consideraram algumas simplificações para tornar o problema da operação de reservatórios linear. Assim, não foram computadas as perdas hídricas decorrentes da evaporação a partir do espelho d'água dos reservatórios e considerou-se constante a característica de geração de cada usina, que depende da variação temporal do nível d'água dos reservatórios. Reis e Pinheiro (2005) empregaram o mesmo método iterativamente para incorporar a evaporação, aplicado ao macro-sistema de reservatórios de abastecimento de Fortaleza (CE).

METODOLOGIA UTILIZADA

Este trabalho representa uma extensão da metodologia proposta por Reis *et al.* (2005). Para dar tratamento às não-linearidades características da evaporação e da variação da característica de geração de cada usina, foi utilizado um algoritmo não-linear de Programação Linear Sucessiva.

Para a determinação dos Fatores de Redução de custo (FRCt), esta pesquisa utilizou Algoritmos Genéticos (AGs). Um refinamento das soluções foi proposto com a utilização do algoritmo de busca local SIMPLEX de Nelder e Mead.

Algoritmos Genéticos (AGs)

Introduzidos por Holland (1975), os Algoritmos Genéticos são técnicas de busca inspiradas e fundamentadas nos processos de seleção e genética natural. Dada uma população inicial de soluções, esta evolui até convergir para uma solução, através da aplicação de operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação.

Existem na literatura dois tipos básicos de AGs, o geracional, com ou sem elitismo, e o Steady State. O elitismo, proposto inicialmente por DeJong em 1975, baseia-se na transferência das melhores soluções de uma população para outra sem alterações, ou seja, sem a aplicação dos operadores genéticos de recombinação e mutação. Desta forma, tais soluções não são perdidas de uma geração para outra. Vale ressaltar que o elitismo pode estimular a ocorrência de máximos locais.

No AG geracional sem elitismo, a cada geração toda a população é substituída, gerando n soluções “filhas” a partir de n soluções “pais”. Caso o elitismo seja utilizado, há a preservação das p melhores soluções a cada iteração, conforme o conceito introduzido anteriormente. No AG Steady State, a cada iteração são criadas n soluções “filhas” para substituir as n piores soluções “pais” da população. Neste trabalho optou-se pela escolha do AG Steady State.

As soluções do problema podem ser codificadas de diversas maneiras (binários, inteiros, reais, etc.). A maioria dos trabalhos encontrados na literatura acerca da utilização dos Algoritmos Genéticos utiliza a codificação binária, em que cada solução é um vetor composto de zeros e uns, com cada bit representando um gene.

Apesar de a representação binária ser mais tradicional, a representação real gera vetores soluções menores e mais naturalmente compreendidos.

A escolha entre as representações binária e real tem sido tema de várias pesquisas e muitas delas têm demonstrado a eficiência da utilização da representação real (Michalewicz e Attia, 1994). No presente trabalho, as soluções serão representadas por números reais.

Segundo recomendações de Nascimento (2006), os operadores genéticos utilizados foram a recombinação aritmética com probabilidade de recombinação de 0,8, seleção por Roda da Roleta das soluções remanescentes e probabilidade de mutação de 0,0588 ($1/L$), em que L é o número de variáveis de decisão (no caso 17) ou a dimensão do vetor decisão.

A busca realizada por estes algoritmos visou à maximização da energia total gerada pelo sistema, de uma forma global, para todo o horizonte de planejamento. Foram produzidos, aleatoriamente, valores reais para o vetor W de variáveis de decisão, dentro da faixa pré-estabelecida para elas, ou seja, o intervalo de 0 a 1. O vetor W de pesos compensatórios determinados pelos AGs é composto dos elementos w_j , com $j=1,2,...,12$, relativos aos meses do ano e w_{NT+i} , com $i=1,..,5$, relativos aos reservatórios do sistema, cujos produtos, ampliados de G , dão origem aos fatores de redução de custo.

Uma forma alternativa à apresentada por Reis et. al. (2005) para a determinação dos Fatores de Redução de Custo foi proposta neste trabalho. Nela, eliminou-se a utilização da constante multiplicadora G e gerou-se diretamente o vetor de pesos W dentro de faixas pré-estabelecidas e de amplitudes variáveis.

Desta forma, pode-se analisar a influência dessa constante multiplicadora na evolução da otimização e na velocidade de convergência dos Algoritmos Genéticos.

Programação Linear Sucessiva

A Programação Linear Sucessiva foi utilizada para resolver cada um dos problemas seriados, a partir dos valores determinados pelos AGs para os FRCs. A proposta de utilização da Programação Linear Sucessiva para contornar os efeitos das não-linearidades é devido ao seu menor tempo de processamento em relação aos demais algoritmos de programação não-linear e à vantagem de se poder utilizar código de programação linear padrão. Yeh et al. (1979) reportam de maneira completa as vantagens da utilização de PL na operação de reservatórios.

Exemplos da aplicação de Programação Linear Sucessiva na otimização de sistemas de reserva-

tórios podem ser encontrados nos trabalhos de Yeh et. al (1979), Tao e Lennox (1991) e Ko et al. (1992).

ESTUDO DE CASO

A metodologia apresentada foi aplicada ao sistema de reservatórios do rio São Francisco. Esse sistema está implantado fundamentalmente para geração de energia elétrica. Contudo, ao longo das últimas décadas, as demandas de água para irrigação vêm aumentando significativamente. Caso as projeções de demanda de irrigação para o futuro se concretizem, haverá uma intensificação no conflito entre esses usos da água na bacia.

O rio São Francisco possui uma extensão de 2.863 km com uma área de drenagem da bacia correspondente a 636.920 km² (8% do território nacional). Abrange 503 municípios e sete Estados (Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e Distrito Federal) (ANA, 2005) e conta com cinco reservatórios no seu curso principal, dos quais dois são de grande capacidade de acumulação, a saber: Três Marias e Sobradinho. Esses dois reservatórios permitem regularização plurianual de vazões, isto é, possuem ciclos de enchimento e esvaziamento superiores a um ano. Os principais reservatórios situados no rio São Francisco são mostrados de forma esquemática na Figura 1.



Figura 1 - Esquema topológico dos reservatórios do rio São Francisco.

Os reservatórios da bacia do rio São Francisco foram construídos com a finalidade principal de produção de energia elétrica, mas devido à sua importância estratégica na regularização do rio, podem-se considerar outros usos para a água nos seus

Tabela 1 - Reservatórios/Usinas da bacia do rio São Francisco.

| Reservatório Usina | Empresa Operadora | Volume Útil (hm ³) | NA máx. Normal (m) | NA mín. Normal (m) | Potência instalada (MW) |
|--------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|
| Três Marias | Cemig | 15.278 | 572,5 | 549,2 | 396 |
| Sobradinho | Chesf | 28.669 | 392,5 | 380,5 | 1050 |
| Itaparica | Chesf | 3.548 | 304,0 | 299,0 | 1500 |
| Moxotó | Chesf | - | 251,5 | 251,5 | 400 |
| P. Afonso 1, 2 e 3 | Chesf | - | 251,5 | 251,5 | 1423 |
| P. Afonso 4 | Chesf | - | 251,5 | 251,5 | 2460 |
| Xingo | Chesf | - | 138,0 | 138,0 | 3000 |

Tabela 2 - Principais restrições operativas do sistema do rio São Francisco.

| Aproveitamento | Vazão Mínima a Jusante (m ³ /s) | Taxa de variação da defluência (m ³ /s/dia) | Vazão Máxima a Jusante (m ³ /s) |
|----------------|--|--|--|
| Três Marias | 500 | 500 a 700 | 2500 |
| Sobradinho | 1300 | 1000 | 8000 |
| Itaparica | 1300 | - | - |
| Moxotó | - | - | - |
| P.Afonso 1/3 | - | - | - |
| P.Afonso 4 | - | - | - |
| Xingó | 1300 | - | 8000 |

procedimentos operativos, tais como, irrigação, navegação e controle de cheias. As principais características desses reservatórios/usinas são mostradas na Tabela 1.

Os dados cadastrais e hidrometeorológicos dos reservatórios/usinas foram coletados junto às fontes do setor elétrico, como o sítio do ONS (www.ons.org.br), o SIPOT (Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro – versão 4.0) da Eletrobrás e nas publicações de Lopes et. al (2002) e Brandão (2004). Nos casos das curvas cota-volume, cota-vazão (curva chave do canal de fuga) e cota-área, o setor elétrico utiliza polinômios de quarto grau que seguem a seguinte formatação: $Y = C_0 + C_1.X_1 + C_2.X_2 + C_3.X_3 + C_4.X_4$.

Quanto às vazões naturais médias mensais nos aproveitamentos, foram utilizadas as séries referentes ao período janeiro de 1931 a dezembro de 2001. Estas vazões foram recentemente corrigidas pela ONS, porém foram utilizadas as vazões disponíveis em Brandão (2004), que também foram obtidas junto à ONS, antes das referidas correções.

Segundo documentos do ONS (2002a), as principais restrições operativas para esses reservatórios são apresentadas na tabela 2.

Com relação às demandas para irrigação, a Agência Nacional das Águas (ANA), em atendimento às solicitações do setor elétrico quanto aos valores de demandas atuais e futuras para irrigação na bacia do rio São Francisco, emitiu a Resolução 145 de 22 de julho de 2002 (ANA, 2002) para a determinação desses valores de demanda. Com base no fator de sazonalidade médio para as demandas na bacia do rio São Francisco, que representa a parcela mensal média das demandas, pode ser estimada as vazões médias mensais retiradas para a irrigação, conforme avaliado pela ANA (Lopes et al., 2002). Não foram admitidas taxas de retorno da água destinada à irrigação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o intuito de tecer uma análise comparativa do método estudado, os resultados obtidos foram confrontados com os apresentados por Brandão (2004), que também estudou a operação do sistema de reservatórios do rio São Francisco, com a aplicação de um algoritmo de programação Não-Linear. Utilizou o pacote MINOS que implementa o

método do gradiente reduzido em combinação com o método quasi-Newton.

Para obter as regras com base na série histórica, o referido autor escolheu quatro séries de seis anos que representassem cenários definidos como seco, mediano e úmido e o cenário correspondente ao período crítico do setor hidrelétrico que, segundo o autor, ocorreu na metade da década de 50. Para o processamento, esse cenário crítico foi definido com base no período de maio de 1951 a abril de 1957.

Os estudos de seleção dos demais cenários hidrológicos foram desenvolvidos a partir das séries de vazão de Três Marias e Sobradinho, principais séries ao longo do rio. Para a definição dos cenários, o autor determinou a distribuição conjunta das médias móveis de Três Marias e a incremental de Sobradinho, obtendo os pontos correspondentes ao 1º, 2º e 3º quartil, ou seja, períodos de 6 anos consecutivos cujas médias móveis estão associadas a probabilidades acumuladas conjuntas, respectivamente, iguais a 25%, 50% e 75%. Com base nos resultados, os cenários hidrológicos foram caracterizados da seguinte forma:

- **Cenário seco:** correspondente aproximadamente a uma probabilidade acumulada igual a 25%, cujas vazões médias referem-se ao período outubro de 1966 a setembro de 1972.
- **Cenário mediano:** correspondente aproximadamente a uma probabilidade acumulada igual a 50%, cujas vazões médias referem-se ao período outubro de 1974 a setembro de 1980.
- **Cenário úmido:** correspondente aproximadamente a uma probabilidade acumulada igual a 75%, cujas vazões médias referem-se ao período outubro de 1940 a setembro de 1946.

Para permitir uma comparação justa dos resultados obtidos com os apresentados por Brandão (2004), adotou-se o mesmo armazenamento inicial escolhido para os reservatórios.

Para esta escolha, foi definido como mês inicial aquele que apresentasse maior média de armazenamento ao otimizar toda série histórica disponível (1931 a 2001). Os resultados indicaram que as médias mais elevadas referem-se aos armazena-

mentos no final do mês de abril. Os valores resultantes foram os seguintes:

- Três Marias = 83% da capacidade;
- Sobradinho = 70% da capacidade;
- Itaparica = 100% da capacidade.

Assim, os cenários hidrológicos já definidos foram estabelecidos com início no mês de maio do ano subsequente.

A metodologia empregada no presente trabalho não estabelece restrição *a priori* acerca do volume nos reservatórios ao final do período de otimização. Logo, a comparação dos resultados obtidos com os apresentados por Brandão (2004) auxilia na verificação da ordem de grandeza dos resultados já que o referido autor otimiza o período com base em premissas acerca do futuro. Para tanto, aplicou-se o método híbrido apresentado anteriormente à série histórica completa disponibilizada pela ONS (1931 – 2001) a fim de se estabelecer o melhor conjunto de pesos para os registros históricos. A seguir, com base nos valores obtidos para os pesos, procedeu-se à otimização dos períodos de seis anos considerados, em escala temporal mensal de forma seriada, para os cenários apresentados.

Para a obtenção dos FRCs, foram feitas simulações para uma série histórica de seis anos (escolhida aleatoriamente e compreendida entre 1996 e 2001), a partir de 30 populações iniciais distintas de soluções geradas aleatoriamente e com valores da constante multiplicadora G de 10, 50, 100, 200, 500 e 1000, com os pesos variando na faixa de 0 a 1. Foram também analisados os pesos gerados diretamente sem a utilização da constante multiplicadora.

Os resultados mostraram a utilização da constante multiplicadora G conduz a uma convergência mais rápida. Os maiores valores para a função de aptidão foram obtidos para as constantes multiplicadoras de 50 e 10, nesta ordem. Esta indicação vai ao encontro dos estudos apresentados por Reis *et al.* (2005) e Reis e Pinheiro (2005), que indicam como 100 o melhor valor para esta constante.

Como forma de reduzir o esforço computacional e refinar as soluções, foi realizada a hibridização do AG com o algoritmo de busca local Simplex, proposto por Nelder e Mead (1965). Desta forma, alia-se a capacidade dos AG's de "varrer" os espaços de busca com rapidez ao método de busca local Nelder e Mead, que também não utiliza derivadas da função objetivo e pode promover o refinamento das soluções obtidas via AG.

As simulações realizadas a partir de 30 populações iniciais de soluções distintas mostrou que a aplicação da hibridização após 100 gerações dos AGs produziu resultados próximos dos obtidos em 1500 iterações de AGs, em termos dos valores da função de aptidão. Observou-se ainda uma redução no tempo computacional médio neste caso de 19 minutos para 125 s. Desta forma, os resultados indicam que a hibridização do AG com o algoritmo de busca local Simplex produziu bons resultados na redução do tempo computacional e no refinamento da solução.

Uma análise estatística simples dos pesos obtidos como resultado pode ser visualizada na Tabela 3.

Tabela 3 - Estatística dos Pesos obtidos para a série histórica completa.

| Pesos | Média | Desvio | CV |
|-------|----------|----------|------|
| W1 | 0,554395 | 0,212137 | 0,38 |
| W2 | 0,554224 | 0,218869 | 0,39 |
| W3 | 0,650508 | 0,244441 | 0,38 |
| W4 | 0,673156 | 0,216326 | 0,32 |
| W5 | 0,601333 | 0,209368 | 0,35 |
| W6 | 0,600185 | 0,185486 | 0,31 |
| W7 | 0,556742 | 0,234813 | 0,42 |
| W8 | 0,553946 | 0,214521 | 0,39 |
| W9 | 0,516363 | 0,217970 | 0,42 |
| W10 | 0,459324 | 0,287600 | 0,63 |
| W11 | 0,431731 | 0,287876 | 0,67 |
| W12 | 0,421039 | 0,222360 | 0,53 |
| W13 | 0,554036 | 0,293034 | 0,53 |
| W14 | 0,074914 | 0,035696 | 0,48 |
| W15 | 0,580888 | 0,263477 | 0,45 |
| W16 | 0,492825 | 0,345268 | 0,70 |
| W17 | 0,474589 | 0,302671 | 0,64 |

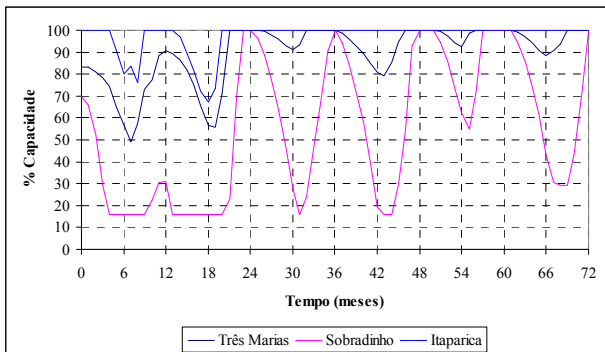


Figura 2 - Volumes Armazenados (Cenário Úmido).

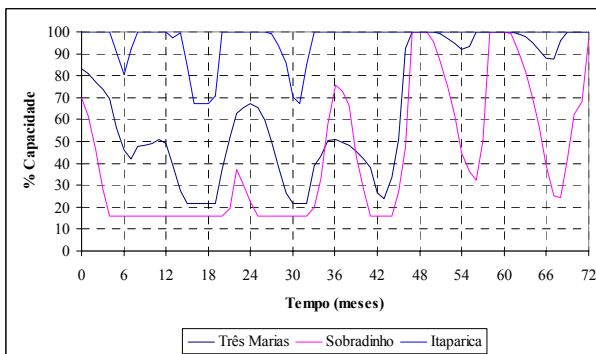


Figura 3 - Volumes Armazenados (Cenário Mediano).

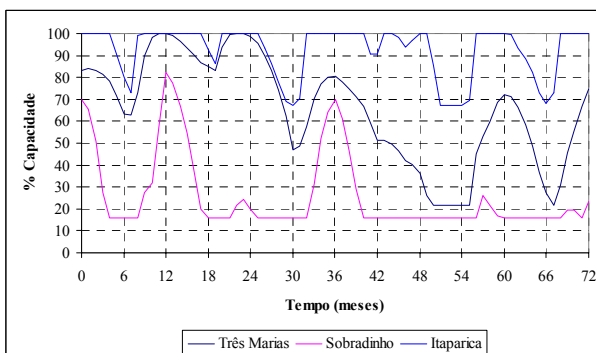


Figura 4 - Volumes Armazenados (Cenário Seco).

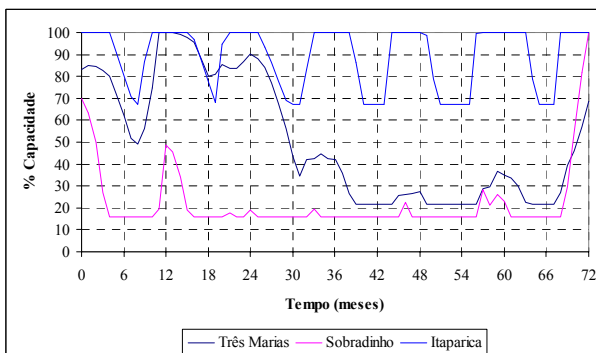


Figura 5 - Volumes Armazenados (Cenário Crítico).

As Figuras 2 a 5 mostram as curvas de trajetórias de armazenamento para cada usina, considerando-se os quatro cenários estudados. Observa-se que os volumes armazenados nos reservatórios seguem uma oscilação natural decorrente da sazonalidade.

Para os quatro cenários estudados, o reservatório de Sobradinho manteve o menor volume percentual armazenado, quando comparado com os demais reservatórios. Tal comportamento pode ser

explicado, principalmente, pela demanda de irrigação existente à jusante do mesmo. Observa-se claramente um ciclo de enchimento intra-anual no reservatório de Itaparica.

Para os cenários seco e crítico do setor elétrico, o modelo resultou em armazenamento próximo ao mínimo para o reservatório de Sobradinho com uma conservação do volume do reservatório de Três Marias para ser utilizado a partir da metade do período, momento em que ocorre um maior deplecionamento dos reservatórios.

Nota-se que para os cenários úmido e mediano, a variação dos volumes nos reservatórios tendem a seguir somente o efeito da sazonalidade, presente tanto nas afluências como nas demandas.

Os resultados obtidos para a energia média mensal gerada com os diversos cenários utilizados podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Estatística dos Pesos obtidos para a série histórica completa.

| Cenário | Energia Média Mensal (MW) | |
|---------|---------------------------|----------------|
| | Modelo Utilizado | Brandão (2004) |
| Seco | 5538 | 5749 |
| Mediano | 6308 | 6410 |
| Úmido | 6982 | 7191 |
| Crítico | 4817 | 5372 |

Os valores obtidos na otimização mostraram-se próximos aos apresentados por Brandão (2004), que utilizou um algoritmo de Programação Não Linear. Em seu trabalho, Brandão estabeleceu que os volumes ao final na simulação deveriam ser iguais aos do início do período. Esta metodologia, não estabelece restrição *a priori* acerca do volume nos reservatórios ao final do período de otimização, não é comparável diretamente com a metodologia seguida por Brandão (2004), que otimiza somente o período em análise. Portanto, as comparações apresentadas servem somente como indicação da ordem de grandeza dos resultados.

Vale frisar ainda que a metodologia em estudo não estabelece regras de operação *a priori*, o que demonstra um avanço da técnica utilizada.

CONCLUSÕES

Este trabalho utilizou e propõe modificações no procedimento híbrido de Algoritmos Gené-

ticos e Programação Linear, apresentado por Reis et al. (2005), como uma aproximação estocástica ao método de decomposição de Bender proposto por Pereira e Pinto (1985).

Para tanto, a Programação Linear utilizada originalmente foi substituída pela Programação Linear Sucessiva e incorporou-se o algoritmo SIMPLEX proposto por Nelder e Mead (1965) para refinar as soluções apresentadas pelos AGs. Com essa substituição, foi possível considerar todas as não linearidades do problema de otimização da operação de sistemas de reservatórios e aplicar a metodologia a um sistema real. A metodologia empregada visou maximizar a energia gerada pelo sistema de estudo, considerando as demandas hídricas como restrições do problema.

O estudo de caso analisado diz respeito aos reservatórios existentes na bacia do rio São Francisco, totalizando cinco usinas em cascata, em que duas operam a fio d'água, o complexo Paulo Afonso-Moxotó e Xingo. Os principais reservatórios, com capacidade de regularização pluri-anual, são Três Marias e Sobradinho, seguidos do reservatório de Itaparica, com capacidade de regularização intra-anual.

Para a determinação das variáveis indiretas dos problemas, os Fatores de Redução de Custo, foram utilizados os Algoritmos Genéticos do tipo steady state.

A comparação dos resultados com os apresentados por Brandão (2004) permitiu concluir que, embora o modelo de otimização utilizado não fixasse regras operacionais *a priori*, ele possibilita a determinação de estratégias de operação relativamente bem definidas a partir dos resultados da otimização, pois estes se aproximaram do ótimo dos períodos analisados.

A operação dos reservatórios foi analisada de acordo com quatro cenários pré-estabelecidos: seco, mediano, úmido e crítico. As curvas de trajetórias de armazenamento para cada usina, considerando-se os quatro cenários estudados, seguiram uma oscilação natural decorrente da sazonalidade.

Na análise da operação dos múltiplos reservatórios, o reservatório de Sobradinho apresentou um menor volume percentual decorrente, principalmente, da demanda de irrigação existente à jusante do mesmo. Observou-se claramente um ciclo de enchimento intra-anual no reservatório de Itaparica.

Para os cenários seco e crítico do setor elétrico, o modelo resultou em armazenamento próximo ao mínimo para o reservatório de Sobradinho com uma conservação do volume do reservatório de

Três Marias para ser utilizado a partir da metade do período, momento em que ocorre um maior deplecionamento dos reservatórios.

Nota-se que para os cenários úmido e mediano, a variação dos volumes nos reservatórios tenderam a seguir somente o efeito da sazonalidade, presente tanto nas afluições como nas demandas.

Vislumbram-se diversas investigações a serem realizadas, dentre as quais incluem-se a análise detalhada da estrutura de pesos arbitrados e a possibilidade do tratamento multiobjetivo do problema, em conformidade com o conceito de Pareto, como uma possibilidade de dar tratamento mais abrangente ao mesmo problema.

A questão da incerteza das afluições naturais deve ser incorporada, possibilitando a análise da influência desta incerteza na determinação dos Fatores de Redução de Custo e no processo de otimização como um todo.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão de bolsa de mestrado e de produtividade em pesquisa, ao primeiro e segundo autor deste trabalho, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- ANA, 2005. Agência Nacional de Águas. Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (2004-2013): síntese executiva com apreciação das deliberações do CBHSF aprovadas na III Reunião Plenária de 28 a 31 de julho de 2004. / Agência Nacional de Águas - Brasília: ANA. 142 p.
- ANA, 2002. Agência Nacional de Águas. Resolução no. 145, de 22 de Julho de 2002. Brasília: Ana, 2002.
- Brandão, J.L.B., 2004. Modelo para operação de sistemas de reservatórios com usos múltiplos. 2004. 160p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Bravo, J.M., Collischonn, W., Pilar, J.V., 2005. Otimização da operação de reservatórios: estado-da-arte.. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- Cai, X., McKinney, D.C., Lasdon, L.S., 2001. Solving nonlinear water management models using combined genetic algorithm and linear programming approach. *Advances in Water Resources*, 24, p. 667-676.
- Celeste, A.B., Suzuki, K., Kadota, A., 2003. Algoritmos genéticos para operação ótima de sistemas de recursos hídricos em tempo real. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8 (3).
- Dejong, K. – The analysis and behaviour of a class of genetic adaptive systems. University of Michigan, 1975 (PhD thesis).
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Jothiprakash, V., Shanthi, G., 2009. Comparison of Policies Derived from Stochastic Dynamic Programming and Genetic Algorithm Models. *Water Resour Manage* (2009) 23:1563–1580.
- Ko, S.K., Fontane, D.G. e Labadie, J.W., 1992. Multiobjective optimization of reservoir systems operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 116(6), 820-838.
- Labadie, J.W., 2004. Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 130(2), 93-111.
- Leite, P.T., Carneiro, A.A.F.M. e Carvalho, A.C.P.L.F., 2002. Energetic operation planning using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, 173-179.
- Lima, H.V.C, Lanna, A.E.L., 2005. Modelos para Operação de Sistemas de Reservatórios: Atualização do Estado da Arte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10 (3).
- Lopes, J.E.G.; Barros, M.T.L.; Brandão, J.L.B., 2002. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco - subprojeto 4.4: determinação de subsídios para procedimentos operacionais dos principais reservatórios da bacia do São Francisco. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA, Novembro 2002.
- Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs*, Springer- Verlag-1994.
- Nascimento, L.S.V., 2006. Estudo da operação otimizada aplicada a um sistema de reservatórios destinado à geração de energia elétrica. 2006. 125p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos - SP.
- Nascimento, L.S.V., Reis, D.S.Jr., Martins, E.S.P.R., 2007. Comparação de algoritmos evolucionários na otimização multiobjetivo de sistemas de reservatórios. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- Nelder, J. A. & Mead, R., 1965. A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 7(4), 308-313.

- Oliveira, R. e Loucks, D.P., 1997. Operation rules for multireservoir systems. *Water Resources Research*, 33(4), 839-852.
- Orero, S.O., Irving, M.R., 1998. A genetic algorithm modeling framework and solution technique for short term optimal hydrothermal scheduling. *IEEE Transaction on Power Systems*. 13(2), p. 501-518.
- ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2002a. Diretrizes para as regras de operação de controle de cheias: ciclo 2002/2003. Rio de Janeiro: Ons Outubro 2002a. (RE 3/229/2002).
- ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2002b. Inventário das restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidrelétricos. Rio de Janeiro: Ons, Novembro 2002b. (RE 3/332/2002).
- Pereira, M.V.F. e Pinto, L.M.V.G., 1985. Stochastic optimization of a multi-reservoir system: a decomposition approach. *Water Resources Research*, 21(6), 779-792.
- Reis, L.F.R. e Akutsu, J., 2002. Estratégias operacionais para sistemas de reservatórios via algoritmo genético. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 7 (3).
- Reis, L. F. R. e Pinheiro, T.M., 2005. Combined Genetic Algorithm-Linear Programming (GA-LP) Procedure Applied to the Operation of Water Supply Reservoir System. In: Dragan Savic; Godfrey Walters; Roger King; Soon-Thiam Khu. (Org.). *Water Management for the 21 st Century*. 1 ed. Exeter, UK, v. 1, p. 129-134.
- Reis, L.F.R., Walters, G.A., Savic, D. e Chaudhry, F.H., 2005. Multi-Reservoir Operation Planning using Hybrid Genetic Algorithm and Linear Programming (GA-LP): An Alternative Stochastic Approach. *Water Resources Management*, 19, 831-848.
- Simonovic, S.P., 1992. Reservoir systems analysis: Closing gap between theory and practice. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 118(3), 262-280.
- Tao, T. e Lennox, W.C., 1991. Reservoir operations by successive linear programming. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 117(2), 274-280.
- Tospornsampan, J., Kita, I., Ishii, M. e Kitamura, Y., 2005. Optimization of multiple reservoir systems operation using a combination of genetic algorithm and discrete differential dynamic programming: A case of study in Mae Klong system, Thailand. *Paddy Water Environ*, 3. p. 29-38.
- Wall, M., 1996. C++ library of genetic algorithm components. Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology.
- Wardlaw, R. e Sharif, M., 2000. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation. *Journal of Water Research Planning and Management*. 125, 25.
- Wurbs, R.A., 1993. Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 119(4), 455-472.
- Yeh, W. W-G., Becker, L. e Chu, W. S., 1979. Real-time hourly reservoir operational. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 105(2), 187-203.
- Yeh, W.W.G., 1985. Reservoir Management and operation models: A state-of-the-art review. *Water Resources Research*, 21(12), 1797-1818.

Optimized Operation Study applied to a Hydropower Reservoir System

ABSTRACT

One of the major uses of system analysis techniques in water resources planning is the determination of the operational strategies for multiple reservoir systems, essential for better water utilization, whose operation is the subject of analyses involving many constraints and decision variables. This operation must be optimized for best use at lowest cost. The main objective of research on the optimal operation of a reservoir system is hydropower generation. The optimization framework employs first a hybrid model which corresponds to a combination of Genetic Algorithms and Nelder and Mead's SIMPLEX followed by Successive Linear Programming. According to Reis et al., 2005, the optimization problem is solved by decomposing it into independent sequential sub-problems corresponding to each stage of the operation. It must be inferred that the reservoir storage volume at the end of one stage and at the beginning of the subsequent one is the same. In order to promote more efficient use of the water utilized to supply future stage demands, CRFs (cost reduction factors) is applied to the remaining storage at the end of each stage. A study on the São Francisco River System was conducted, and the data reported here are promising.

Keywords: optimization, reservoir systems, genetic algorithm, Nelder and Mead, successive linear programming.