

SFPLUS: Modelo para Avaliação do Desempenho de Sistemas de Reservatórios com Usos Múltiplos

João Luiz Boccia Brandão

Consultor de Recursos Hídricos, Hidrologia e Drenagem Urbana

jlb@uol.com.br

Mario Thadeu Leme de Barros

Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária – Escola Politécnica da USP

mtbarros@usp.br

Recebido: 08/03/05 revisado: 04/08/05 aceito: 17/01/06

RESUMO

Este trabalho, que corresponde a um extrato da tese de doutorado desenvolvida por Brandão (2004), é fundamentado no uso de modelos de otimização de Programação Não-Linear criados com a ferramenta GAMS e resolvidos com o pacote MINOS, que resultou no modelo SFPLUS. O estudo de caso refere-se ao sistema de reservatórios da bacia do rio São Francisco. O estudo enfoca a otimização do sistema segundo o método das restrições e o método das ponderações. Faz-se também uma exploração sobre o tratamento dos aspectos estocásticos do problema. Os resultados indicam que o método das restrições é mais fácil e direto de ser aplicado. Porém, permite a análise de no máximo três usos. O método das ponderações permite avaliar um número maior de usos. Contudo, é necessário estabelecer a priori os coeficientes de ponderação entre estes. O uso de séries sintéticas afeta os resultados da análise de usos múltiplos, quando comparados com os resultados obtidos a partir de dados históricos.

Palavras-chave: Otimização; sistemas de reservatório; usos múltiplos.

INTRODUÇÃO

Atualmente, prevalece, nos estudos de operação de sistemas de reservatórios, o enfoque do aproveitamento múltiplo das águas, ou seja, sistemas de exploração e controle de recursos hídricos voltados para a satisfação das necessidades humanas e das demandas vinculadas às atividades econômicas e sociais. Estas incluem o fornecimento de água para as cidades e indústrias, a irrigação, a geração de energia elétrica, a navegação, os usos relacionados com o lazer e a recreação das populações, o controle de cheias e o controle da poluição hídrica.

Muitas vezes há conflitos, uma vez que o recurso disponível não é suficiente para atender às demandas de todos os usuários de um determinado sistema. Nesse sentido, é fundamental avaliar objetivamente a potencialidade do sistema e a sua melhor forma de operação.

OBJETIVOS

Este estudo tem por objetivo analisar técnicas de pesquisa operacional aplicada à operação de

sistemas de reservatórios com usos múltiplos, tais como a programação não-linear, e avaliar o seu desempenho na solução dos problemas propostos.

A maior parte das análises e avaliações propostas foram feitas a partir de estudo de caso, tendo por base o sistema de reservatórios existentes na bacia do rio São Francisco. Nessa bacia, já existem conflitos pelo uso da água, devido ao crescimento das demandas da água para irrigação e pela possível transposição das águas do São Francisco para a região semi-árida do Nordeste setentrional. Além disso, há problemas devido à poluição das águas em certos trechos desse rio e problemas de preservação do meio-ambiente.

METODOLOGIA

A metodologia a ser enfocada neste trabalho pretende contribuir para o aprimoramento da modelagem de sistemas de reservatórios com usos múltiplos, explorando formas alternativas de equacionamento do problema. Atualmente, a modelagem desses sistemas utilizada pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) considera os demais usos

da água como restrições a serem atendidas (Lopes et al., 2002). Outro aspecto que se pretende explorar é a questão do risco hidrológico associado às vazões naturais afluentes aos reservatórios.

A metodologia utilizada é geral, uma vez que pode ser aplicada a qualquer tipo de sistema de reservatórios de recursos hídricos.

Modelagem de Sistemas de Reservatórios

O problema de otimização da operação de um sistema de reservatórios para usos múltiplos pode ser formulado da seguinte maneira:

Maximizar ou Minimizar:

$$F.O. = \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n R_{i,t} \quad (1)$$

Onde F.O. é a função-objetivo; $R_{i,t}$ é uma função que mede o retorno e/ou desempenho associado ao reservatório i no intervalo t ; $i = 1, 2, \dots, m$ (m = número de reservatórios do sistema); $t = 1, 2, \dots, n$ (n = número de intervalos de tempo).

Sujeito a:

$$VF_{i,t} = VF_{i,t-1} + [QA_{i,t} - QD_{i,t} - QC_{i,t}] \cdot K - EV_{i,t} \quad (2)$$

$$Vmínimo_i < VF_{i,t} < Vmáximo_i \quad (3)$$

$$QDmínimo_i < QD_{i,t} < QDmáximo_i \quad (4)$$

$$QCmínimo_i < QC_{i,t} < QCmáximo_i \quad (5)$$

$$QD_{i,t} > 0 \quad (6)$$

Onde $QD_{i,t}$ = vazão defluente do reservatório i ao longo do intervalo de tempo t (variável de decisão) em m^3/s ; $QC_{i,t}$ = vazão do uso consuntivo do reservatório i ao longo do intervalo de tempo t (pode ser variável de decisão ou apenas uma restrição, depende do tipo de função-objetivo) em m^3/s ; $QA_{i,t}$ = vazão afluente ao reservatório i ao longo do intervalo de tempo t (inclui a vazão da área de drenagem intermediária entre o reservatório i e os reservatórios imediatamente a montante, mais a soma-tória das defluências desses reservatórios) em m^3/s ; K = é uma constante para transformação das vazões que estão em m^3/s para volumes mensais em m^3 , ou

múltiplos dessa unidade; $VF_{i,t}$ = volume do reservatório i no fim do intervalo t (variável de estado) em m^3 , ou múltiplos dessa unidade; $EV_{i,t}$ = volume evaporado a partir do reservatório i durante o intervalo t em m^3 , ou múltiplos dessa unidade.

Hashimoto et al. (1982) apresentam alguns critérios para avaliação de desempenho de sistemas de reservatórios, especialmente importantes em períodos de estiagem, picos de demanda ou períodos hidrológicos extremos. Esses critérios são chamados de confiabilidade, (relacionado com o risco de falha do sistema), resiliência (associado à velocidade de recuperação do sistema após a ocorrência de uma falha) e vulnerabilidade (relativo à severidade das conseqüências decorrentes de uma falha do sistema). Assim, a equação 1 que representa genericamente a função-objetivo do problema, pode incluir um desses critérios dependendo do tipo de análise que se pretenda obter a partir do processo de modelagem.

Da mesma forma, a função-objetivo pode ser estabelecida com base na maximização do retorno econômico e social do sistema, minimização de vertimentos, minimização da evaporação dos lagos, etc.

Numa tentativa de formalizar e racionalizar a solução do problema de otimização com múltiplos usos, com base nas abordagens devidas a Loucks et al. (1981) e Lopes et al. (2002), podem-se definir dois métodos:

Método das Ponderações - inclui na função-objetivo diversas variáveis de decisão diretas ou indiretas, como por exemplo: vazão para geração de energia, vazão para irrigação, vazão para outros usos consuntivos, níveis mínimos e máximos para navegação, recreação, conservação, etc. Neste caso, as equações de restrição consideradas são as de características físicas e de balanço hídrico. Nesse método, a função-objetivo é do tipo ponderada, onde os pesos de cada objetivo são definidos pelo decisor.

Método das Restrições - inclui na função-objetivo um único uso, como por exemplo, a geração de energia e considera os outros usos nas equações de restrição. Pode-se, então, determinar as relações de troca entre os usos (curvas de Pareto), variando-se os limites de atendimento de cada objetivo em relação a outro.

Tomando-se o caso da irrigação e da geração de energia, apresenta-se, a seguir, o equacionamento dos dois métodos propostos. Neste caso, busca-se a maximização da energia média e da vazão

média para irrigação ao longo do período de análise.

Função-objetivo método das ponderações:

$$\text{Max} \left(\alpha \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n E_{i,t}}{n} + \beta \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n QI_{i,t}}{n} \right) \quad (7)$$

Função-objetivo método das restrições:

$$\text{Max} \left(\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n E_{i,t}}{n} \right) \text{ com } QI_{i,t} = DI_{i,t} \quad (8)$$

Onde $QI_{i,t}$ = vazão para irrigação fornecida pelo reservatório i no intervalo t ; $DI_{i,t}$ = demanda para irrigação a ser atendida pelo reservatório i no intervalo t ; $E_{i,t}$ = energia gerada pela usina do reservatório i no intervalo de tempo t ; α e β são os parâmetros de ponderação para cada uso.

Os parâmetros α e β são valores que expressem a importância relativa de cada um dos usos. De certa forma, indicam uma ordem de preferência de um uso sobre outro, ou seja, uma ordem hierárquica. Esses parâmetros são atribuídos pelos decisores e/ou gestores de forma subjetiva. Neste estudo, esses parâmetros foram alvo de análise de sensibilidade.

A Questão da Geração de Hidroeletricidade

Quando um dos usos de um dado sistema é a geração de energia elétrica, o problema de operação de reservatórios deve ser complementado pelas funções que regem a produção energética, como segue:

$$E_{i,t} = 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot ng_i \cdot nt_i \cdot nh_i \cdot HB_{i,t} \cdot QT_{i,t} \quad (9)$$

Onde $E_{i,t}$ = a geração média do reservatório i no intervalo t em MW-médios, que é a energia correspondente à potência média gerada ao longo de um mês ou de um certo número de meses; ng_i , nt_i e nh_i = respectivamente, os rendimentos médios do gerador, turbina e circuito hidráulico (adução e restituição); $HB_{i,t}$ = queda bruta média mensal do reservatório i no intervalo t em metros (diferença entre os níveis d'água do reservatório e do canal de fuga da usina); $QT_{i,t}$ = vazão turbinada pela usina

correspondente ao reservatório i no intervalo t em m^3/s .

Na seqüência, apresenta-se o equacionamento do problema de operação de um sistema de reservatórios voltados para a geração de energia elétrica partindo-se do equacionamento proposto inicialmente. Neste caso, utiliza-se uma função-objetivo que busca a maximização da energia média do sistema ao longo do período de análise.

$$\text{Max} \left(\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n PRT_{i,t} \cdot QT_{i,t}}{n} \right) \quad (10)$$

Com

$$PRT_{i,t} = 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot ng_i \cdot nt_i \cdot nh_i \cdot HB_{i,t} \quad (11)$$

Onde $QT_{i,t}$ = vazão turbinada pela usina correspondente ao reservatório i no intervalo t em m^3/s . $PRT_{i,t}$ = produtibilidade da usina i no mês t em $MW/m^3/s$.

Sujeito a:

$$VF_{i,t} = VF_{i,t-1} + [QA_{i,t} - QT_{i,t} - QV_{i,t} - QC_{i,t}] \cdot K - EV_{i,t} \quad (12)$$

$$V_{\text{mínimo}_i} < VF_{i,t} < V_{\text{máximo}_i} \quad (13)$$

$$PRT_{i,t} \cdot QT_{i,t} < PI_i \cdot ID_i \quad (14)$$

$$QT_{\text{mínimo}_i} < QT_{i,t} < QT_{\text{máximo}_i} \quad (15)$$

$$QC_{\text{mínimo}_i} < QC_{i,t} < QC_{\text{máximo}_i} \quad (16)$$

$$QT_{i,t} \text{ e } QV_{i,t} > 0 \quad (17)$$

Onde $QV_{i,t}$ = vazão vertida pela usina correspondente ao reservatório i no intervalo t em m^3/s ; PI_i = potência instalada da usina i em MW; ID_i = índice de disponibilidade de máquinas da usina i , que define a potência média disponível ao longo do tempo, descontadas as horas paradas para manutenção, programada ou forçada, e demais reservas.

A função-objetivo representada na eq.(10) é não-linear, pois $PRT_{i,t}$ é uma função não-linear do volume do reservatório e da vazão defluente (soma das vazões turbinadas e vertidas). Para se obter o

valor de $PRT_{i,t}$ deve-se calcular a queda bruta média ao longo do intervalo t . Essa queda é obtida pela diferença entre o nível d'água do reservatório (nível de montante) e o nível d'água de jusante. O nível d'água do reservatório é calculado com base na sua curva cota-volume. O nível d'água de jusante é obtido a partir da curva-chave (relação cota-descarga) do canal de fuga da usina. Ambas as relações são representadas por equações não-lineares.

Tratamento da Questão Estocástica

O modelo de otimização formulado tem um caráter estocástico, uma vez que as vazões naturais afluentes aos reservatórios são variáveis aleatórias associadas ao tempo, cujas realizações futuras são desconhecidas.

Uma forma de se tratar o problema indiretamente é através do chamado método implícito. A partir de um modelo de geração de séries temporais, são geradas diversas seqüências de aflúncias naturais sintéticas, que são então utilizadas como dados de entrada para solução do problema de otimização. Os resultados obtidos são analisados estatisticamente e, a partir daí, são definidas as regras de operação do sistema, os níveis de garantia para atendimento das demandas, etc.

A literatura sobre a modelagem e o tratamento de séries temporais é muito vasta. Uma das referências mais importantes sobre o tema é devida a Box et Jenkins (1976). Nessa obra, os autores apresentam uma série de modelos estocásticos e definem os principais métodos e análises utilizadas para a seleção de modelos, estimação de parâmetros, transformações, testes de hipótese, etc.

Outra referência importante em hidrologia estocástica é de autoria de Salas (1993). Nessas duas referências, são descritos os modelos AR (auto-regressivo) e ARMA (auto-regressivo e de médias móveis), que são os mais utilizados em hidrologia e em muitas outras áreas, com algumas adaptações, dependendo do tipo da série temporal e da aplicação da modelagem. Também existem os modelos MA (médias móveis) e ARIMA (auto-regressivo e de médias móveis, integrado).

Os cálculos que envolvem a análise de séries temporais e todas as estimativas associadas são muitas vezes complexos e de difícil execução. Atualmente, dispõe-se de diversos pacotes computacionais que são ferramentais fundamentais e imprescindíveis para se aplicar a modelagem estocástica. Para realização deste estudo foi utilizado o pacote GESS (Gerador Estocástico de Séries Sintéticas), desenvolvido pela Kelman Consultoria (2001a).

ESTUDO DE CASO

A metodologia proposta foi aplicada ao sistema de reservatórios do rio São Francisco. Esse sistema foi implantado fundamentalmente para geração de energia elétrica visando o abastecimento da região Nordeste. Contudo, ao longo das últimas décadas, as demandas de água para irrigação vêm aumentando significativamente.

O Sistema São Francisco

A bacia do rio São Francisco conta com seis 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. O reservatório de Itaparica, situado a jusante de Sobradinho, apresenta capacidade de regularização anual, os demais possuem pequena capacidade de acumulação de água. A jusante de Itaparica, estão localizadas as usinas do complexo Moxotó-Paulo Afonso e a UHE Xingó. A Figura 1 apresenta o esquema topológico com os reservatórios/usinas desse sistema.

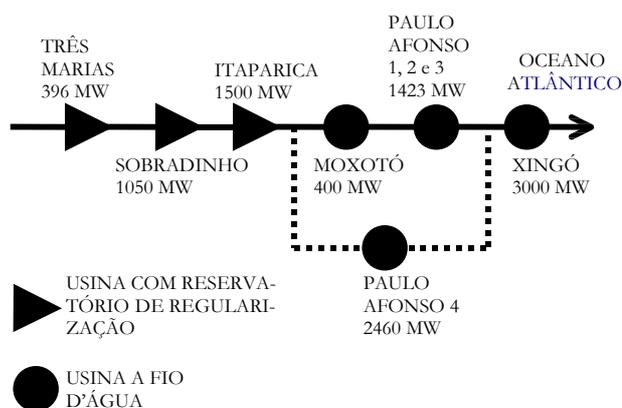


Figura 1 - Esquema Topológico do São Francisco

As usinas do São Francisco pertencem ao subsistema nordeste, exceto Três Marias, que pertence ao subsistema sudeste.

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). Na publicação devida a Lopes et al. (2002), também é possível encontrar os dados cadastrais das usinas do São Francisco.

Quanto às vazões naturais médias mensais nos aproveitamentos, foram utilizadas as séries referentes ao período janeiro de 1931 a dezembro de 2001 utilizadas pelo ONS.

Ainda segundo documentos do ONS (2002a), as principais restrições operativas para esses reservatórios são referentes a vazões mínimas e ao controle de cheias. As restrições de vazão mínima são necessárias para garantir calado para as embarcações que trafegam no rio. As de vazão máxima foram fixadas para conter inundações nas cidades ribeirinhas.

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), cujos valores, referentes às demandas previstas para 2007, foram utilizados neste trabalho.

Desenvolvimento do Modelo SFPLUS

O modelo SFPLUS foi elaborado com base na linguagem estruturada para solução de problemas de programação matemática GAMS (Brooke et al., 1998). O solver utilizado foi o MINOS (Murtagh et Saunders, 1995) que permite a solução de problemas de programação linear e não-linear.

Os usos enfocados no estudo de caso foram a geração de energia elétrica e a irrigação, pois são os principais usos conflitantes na bacia do São Francisco.

O problema de otimização também levou em conta as demais restrições operacionais para cada reservatório/usina.

O intervalo de tempo de cálculo adotado é mensal e o horizonte do período de análise é igual a 6 anos (72 meses).

O modelo foi desenvolvido em dois módulos. O primeiro módulo trata o problema segundo o método das restrições. Nesse caso, a função-objetivo busca maximizar a energia média gerada pelo sistema ao longo do período de análise. O segundo módulo enfoca o problema de acordo com o método das ponderações. Nesse equacionamento se inclui uma função-objetivo que busca maximizar uma ponderação entre a energia média gerada pelo sistema e a vazão média total extraída do sistema para irrigação.

ANÁLISE DA OPERAÇÃO PARA USOS MÚLTIPLOS

Nesta fase, foram utilizadas seqüências temporais de vazões médias mensais com extensão de seis anos, referentes a cenários hidrológicos pré-definidos.

Seleção de Cenários Hidrológicos

Os estudos de seleção de cenários hidrológicos foram desenvolvidos a partir das séries de vazão de Três Marias e Sobradinho, que foram consideradas as séries “chave” para este estudo.

Os valores dos coeficientes de correlação entre as séries de Três Marias e a Incremental de Sobradinho são da ordem de 0,65, tanto para as séries anuais como para as séries mensais. Esse número indica que há uma considerável correlação espacial entre essas duas séries de vazão que deve ser levada em conta na formulação dos cenários hidrológicos.

Para seleção dos cenários, foram calculadas as médias móveis de 6 anos consecutivos para essas duas séries de vazão. A partir da distribuição conjunta dessas duas variáveis, foram selecionados os casos que correspondem aproximadamente 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%. Esses cenários foram denominados: “seco”, “mediano” e “úmido”, respectivamente.

Análise de Usos Múltiplos: Método das Restrições

Os processamentos para análise do método das restrições com o modelo SFPLUS foram feitos com base na maximização da energia média gerada em cada seqüência temporal considerada. As vazões derivadas para irrigação foram tratadas como restrições. Foram considerados os três cenários hidrológicos selecionados e mais o cenário correspondente ao período crítico dos sistemas interligados, que ocorreu na primeira metade da década de 1950 (junho de 1949 a novembro de 1956).

Os resultados obtidos estão reproduzidos no gráfico da Figura 2, onde é possível visualizar a relação de troca, ou seja, o trade-off entre a irrigação e a geração hidrelétrica no sistema São Francisco. As curvas apresentadas nessa figura são as chamadas curvas de Pareto. Os gradientes dessas curvas indicam o valor do trade-off entre esses dois usos. No caso do cenário seco e do período crítico, esse grã-

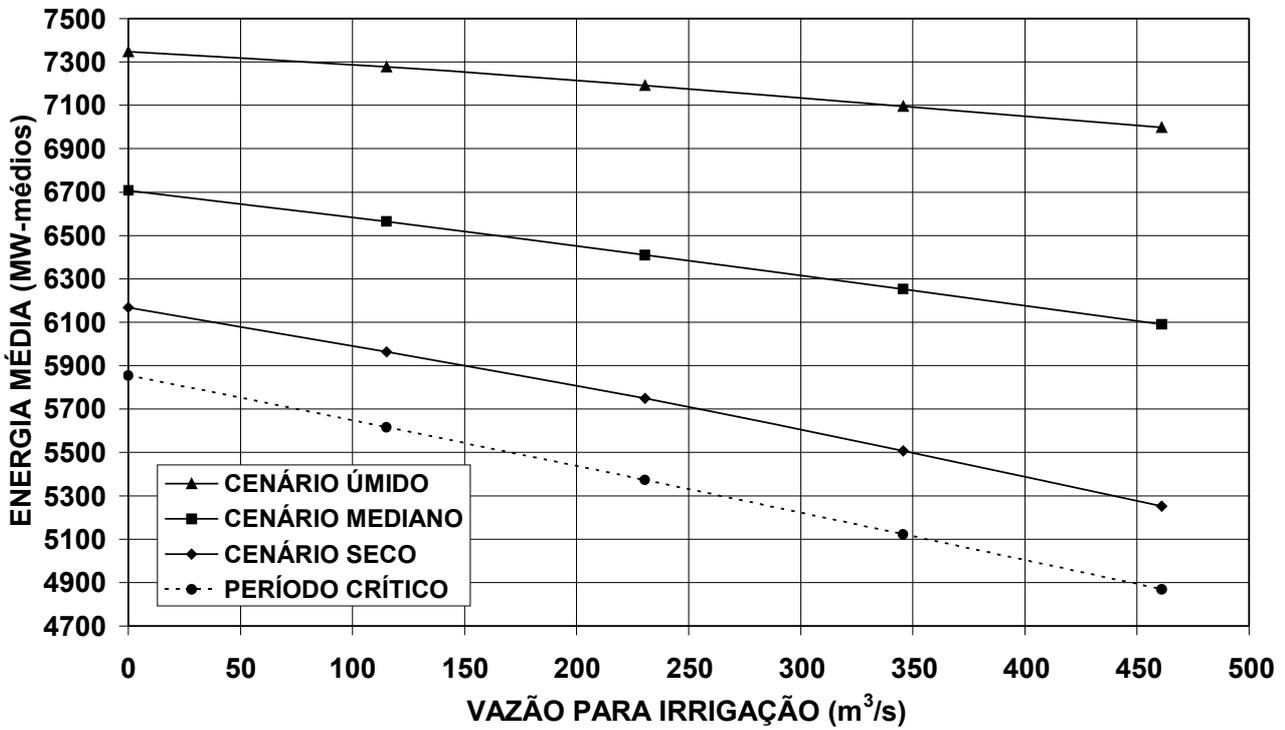


Figura 2 - Curvas de Pareto com Séries Históricas.

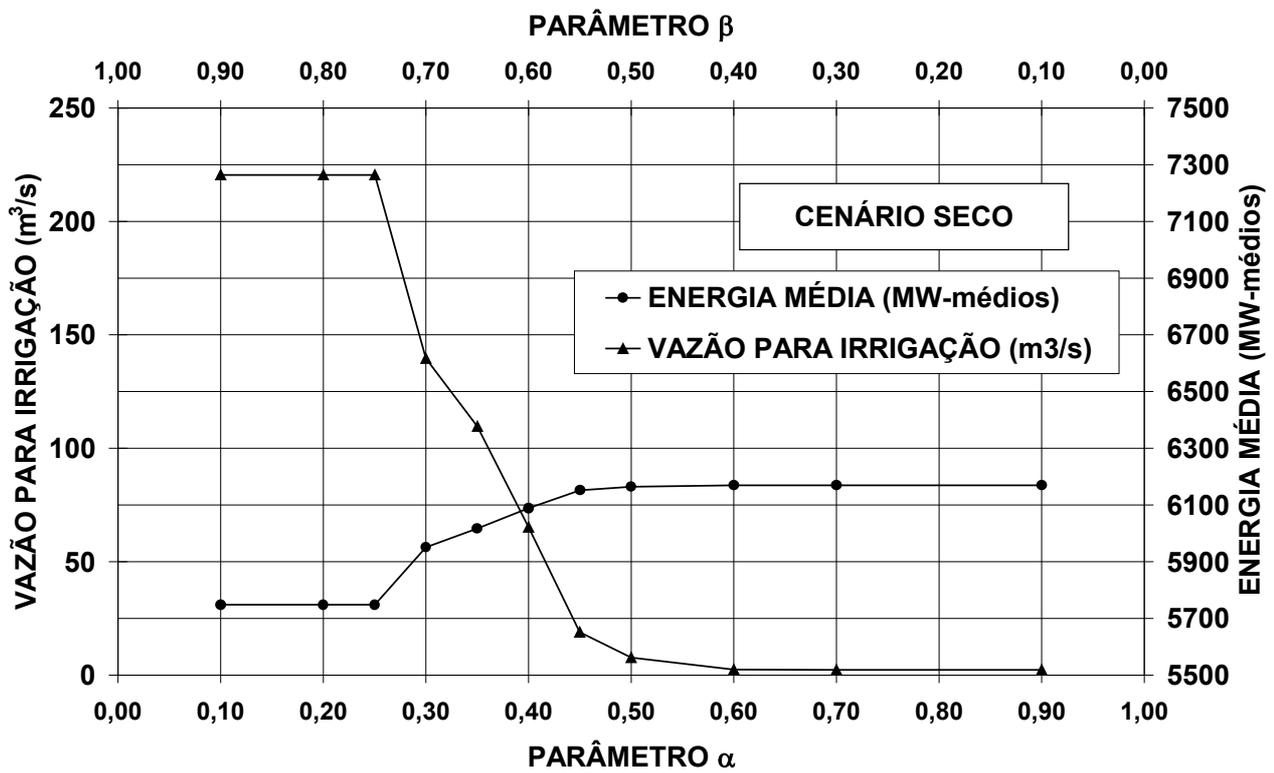


Figura 3 - Método das Ponderações – Cenário Seco.

diente é da ordem de -2 MW-médios de geração por m³/s derivado para irrigação. Ou seja, para cada m³/s utilizado na irrigação, perde-se cerca de 2 MW-médios, que ao longo de um ano totalizam 17,5 GWh de energia.

Nos casos dos cenários mediano e seco, esses gradientes são respectivamente da ordem -1,3 e -0,8, conseqüência de uma maior disponibilidade hídrica contida nesses cenários. Com base nesses resultados, é possível notar a influência dos cenários hidrológicos nos trade-offs entre esses dois usos. Neste caso, como a vazão para irrigação é uma restrição a ser atendida sempre, a disponibilidade hídrica condiciona o quanto pode ser gerado pelas usinas hidrelétricas.

Análise de Usos Múltiplos: Método das Ponderações

Para avaliação do método das ponderações foi utilizado o módulo do modelo SFPLUS voltado para esse tipo de formulação. Apenas para efeito de facilitar a análise, foram selecionados parâmetros de ponderação α (energia) e β (irrigação) complementares, ou seja, valores cuja soma é igual à unidade. Não há, contudo, necessidade que esses parâmetros sejam complementares, apenas que expressem uma ordem de preferência entre um uso frente aos demais. Na Figura 3, são mostrados os resultados obtidos para o cenário seco.

Segundo esses resultados, nota-se que, há uma região onde o trade-off entre a irrigação e a energia se dá de uma forma mais intensa. Essa região corresponde aproximadamente a valores de α entre 0,25 ($\beta = 0,75$) e 0,60 ($\beta = 0,40$). Fora dessa região encontram-se os limites máximo e mínimo para utilização dos dois usos. Ou seja, para valores de α abaixo de 0,25 (β acima de 0,75), encontra-se o limite superior da vazão para irrigação. Nesse caso, os valores da energia são mínimos, e correspondem a cerca de 5750 MW-médios. Para α acima de 0,60 (β abaixo de 0,40), encontram-se os valores mínimos para a irrigação. Em contraposição, esses casos resultam nos valores máximos de energia, ou seja, 6170 MW-médios.

Análise Econômica

Uma forma de se resolver um problema de otimização com objetivo econômico é considerar na função-objetivo os benefícios econômicos produzidos pelo sistema em análise. Essa é na realidade uma

forma particular do método das ponderações, onde os parâmetros de ponderação são explicitados a partir de valores econômicos.

No caso da irrigação e da geração hidrelétrica no vale do São Francisco, foram levantados dados para se calcular a receita bruta anual decorrente desses dois usos da água.

Para a quantificação da receita proveniente da irrigação, foi utilizada a vazão específica média de 0,58 l/s/ha, conforme ANA (2002). Para o valor da produção bruta anual por hectare irrigado, foi utilizado o índice de R\$ 2.500,00/ha, levantado a partir de dados da produção de campos irrigados existentes na bacia (CODEVASF, sem data) referentes ao ano 2000.

Quanto ao valor da energia gerada, foi estimado o índice de R\$ 43,75/MWh obtido com base na produção e na receita da CHESF referentes à geração no ano de 2002 (CHESF, 2002).

A partir desses dados foi possível estabelecer uma função-objetivo com a finalidade de maximizar a receita bruta anual possível de ser auferida no sistema de reservatórios do São Francisco, considerando a irrigação e a geração de energia hidrelétrica.

Sabe-se que esses valores unitários são apenas indicadores do real valor econômico de cada um desses usos. Além disso, seria mais adequado analisar o problema do ponto de vista do benefício líquido, ou seja, haveria que se descontar desses índices os correspondentes valores dos custos operacionais. Como esses dados são de difícil avaliação, especificamente no que se refere à irrigação, optou-se pela análise com base na receita bruta.

Com o objetivo de contornar esses problemas, as análises foram feitas alterando-se os valores unitários adotados e verificado a sua influência nos resultados obtidos. Foram admitidas as seguintes alternativas para os valores unitários do hectare irrigado e da energia gerada:

Alternativa 1: 1,0*R\$2500,00/há e 1,0*R\$43,75/MWh.

Alternativa 2: 1,0*R\$2500,00/ha e 2,0*R\$43,75/MWh.

Alternativa 3: 0,5*R\$2500,00/ha e 2,0*R\$43,75/MWh.

Alternativa 4: 0,5*R\$2500,00/ha e 3,0*R\$43,75/MWh.

Tabela 1 – Resultados da Análise Econômica

ALTERNATIVAS DE COMPOSIÇÃO DE VALORES UNITÁRIOS	CENÁRIO SECO		CENÁRIO MEDIANO		CENÁRIO ÚMIDO	
	VAZÃO IRRIGAÇÃO (m ³ /s)	ENERGIA MÉDIA (MW-médios)	VAZÃO IRRIGAÇÃO (m ³ /s)	ENERGIA MÉDIA (MW-médios)	VAZÃO IRRIGAÇÃO (m ³ /s)	ENERGIA MÉDIA (MW-médios)
1	220,50	5749	220,50	6410	220,50	7191
2	220,50	5749	220,50	6410	220,50	7191
3	220,50	5749	220,50	6410	220,50	7191
4	109,59	6017	136,69	6612	220,50	7191

Observando-se os resultados da Tabela 1, verifica-se que para a quase totalidade das situações analisadas, a otimização econômica implica em se adotar como vazão para irrigação, o valor máximo admitido para esse uso neste estudo (demanda prevista para 2007). Apenas nos caso dos cenários seco e mediano, e valorizando a irrigação em R\$1250,00/ha e a energia em R\$ 131,25/MWh, é que há algum *trade-off* entre esses dois usos, caso contrário, do ponto de vista macroeconômico, vale a pena atender as demandas para irrigação na bacia, mesmo que haja algum prejuízo para a geração hidrelétrica.

Essa é uma outra forma de se explicitar o *trade-off* entre dois usos conflitantes. A otimização econômica é menos abrangente que a análise multi-objetivo, enfocada neste estudo através do método das ponderações, porém o processo é menos subjetivo, desde que os índices unitários de avaliação econômica dos benefícios sejam definidos de forma realista.

ANÁLISE ESTOCÁSTICA DA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

Na seqüência do trabalho, foi feita uma avaliação do tratamento da questão estocástica relacionada com a natureza aleatória das vazões naturais afluentes aos reservatórios. Essas avaliações foram desenvolvidas a partir da formulação do problema de otimização segundo o método das restrições, com a imposição das demandas para irrigação como res-

trição a ser atendida pelo sistema. A função-objetivo adotada foi a maximização da energia média anual. A partir do uso do software GESS foram gerados trechos de série com extensão de seis anos. Com o intuito de se avaliar a influência do número de séries nos resultados, foram considerados conjuntos com 200, 500 e 1000 séries.

A partir do processamento do modelo de otimização com os três conjuntos de séries sintéticas (200, 500 e 1000 séries) foram calculadas as distribuições de probabilidades acumuladas de energia média correspondentes, mostradas na Figura 4.

Além disso, foram geradas 65 séries com extensão de seis anos cada a partir dos dados das séries históricas de vazões médias mensais, disponíveis para o período 1931 a 2001. Dessa forma, cada série de 6 anos teve como início cada ano do traço histórico, até o ano de 1995.

A distribuição de probabilidades para a energia gerada obtida a partir do histórico de vazões também é apresentada na Figura 4, juntamente com as distribuições já definidas com base nas séries sintéticas.

A partir da análise visual das curvas da figura anterior, nota-se uma maior discrepância entre a distribuição devida aos traços históricos em relação àquelas resultantes da aplicação de séries sintéticas, principalmente nos extremos.

Foram também traçadas as curvas de Pareto para o 1º, 2º e 3º quartís para modelagens com 500 séries sintéticas. Essas curvas são mostradas na Figura 5.

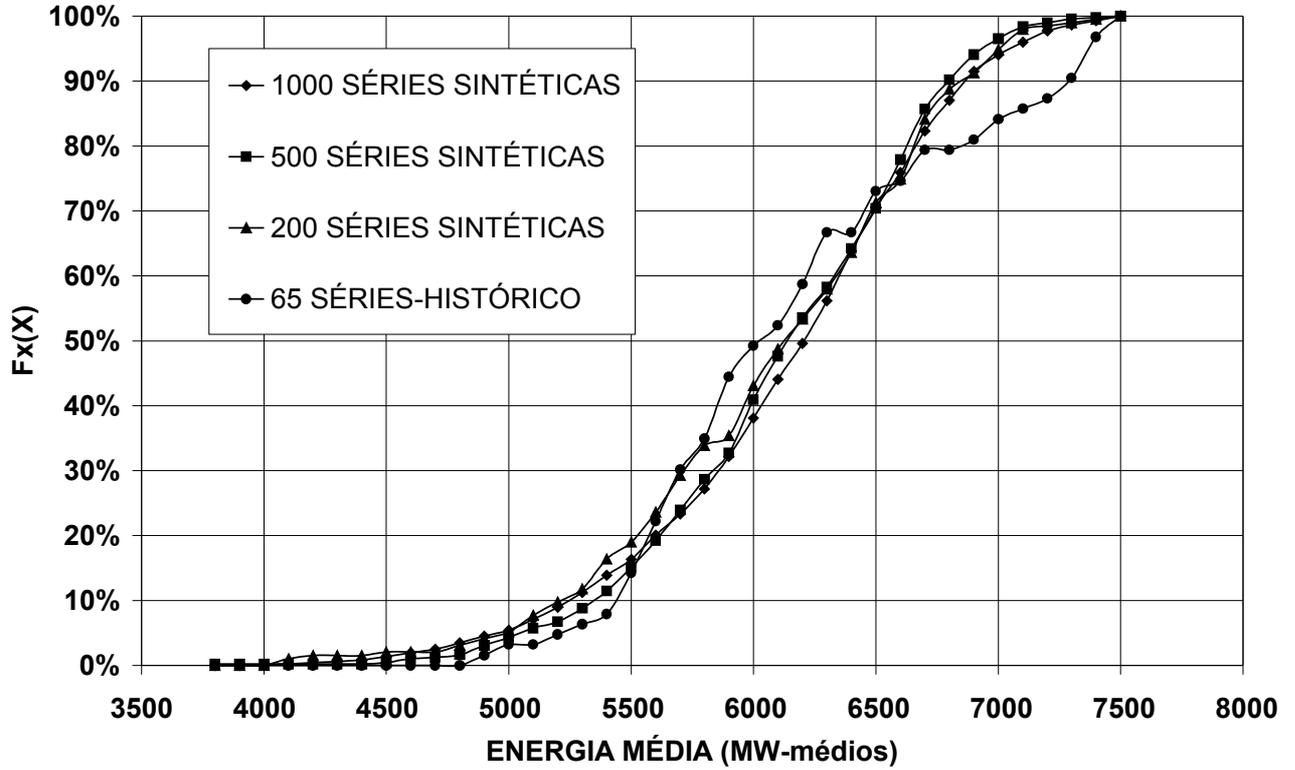


Figura 4. Curvas de Probabilidades Acumuladas de Energia Obtidas com Séries Sintéticas e Séries Históricas.

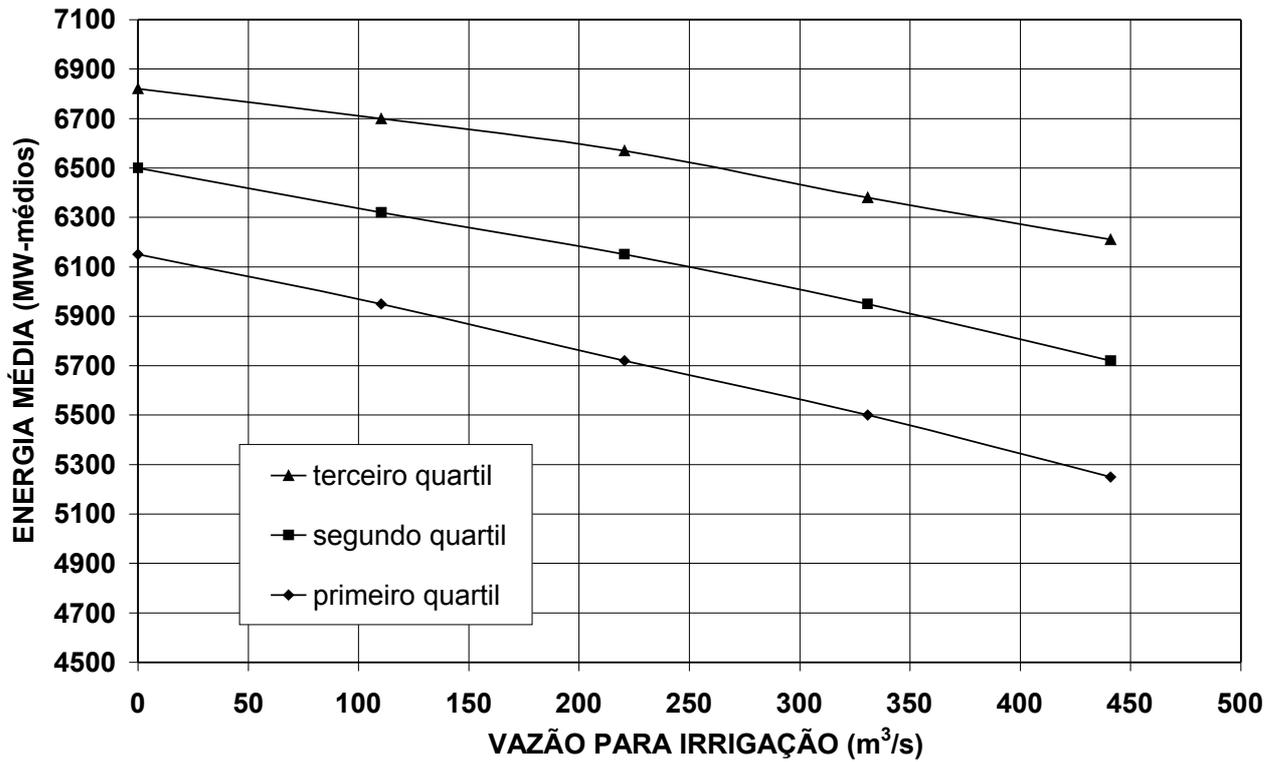


Figura 5. Curvas de Pareto com Séries Sintéticas.

Os gradientes dessas curvas são -2,0; -1,7 e -1,3 MW-médio/m³/s, respectivamente, para o 1º, 2º e 3º quartil. Os valores dos gradientes determinados para os cenários extraídos da série histórica, conforme visto anteriormente, são -2,0; -1,3 e -0,8 MW-médio/m³/s, respectivamente, para os cenários seco, mediano e úmido. Comparando-se esses números, observa-se para o cenário seco os mesmos valores do trade-off. Nos caso dos cenários mediano e úmido, os trade-offs obtidos com as séries sintéticas são mais acentuados que os correspondentes às séries históricas.

A partir da comparação das curvas de Pareto obtidas por séries sintéticas com às referentes a séries históricas, verifica-se que, para o cenário seco, as curvas são praticamente coincidentes. Com relação aos cenários mediano e úmido, as curvas obtidas com a série histórica são superiores àquelas obtidas com as séries sintéticas. Para o cenário mediano, verifica-se que o incremento da energia gerada está entre 3% e 6%, conforme a vazão utilizada para a irrigação. Para o cenário úmido, esse incremento varia entre 8% e 13%.

Esses resultados indicam que, para o cenário seco, é indiferente usar cenários hidrológicos extraídos da série histórica ou a geração de séries sintéticas. Para os cenários mediano e úmido, a utilização de séries sintéticas repercute em avaliações mais severas tanto dos trade-offs (gradientes mais acentuados) como dos valores da energia gerada.

CONCLUSÕES

As principais conclusões derivadas a partir dos resultados deste trabalho são expressas a seguir.

O método das restrições é mais fácil e direto de ser aplicado. Explicita claramente os trade-offs entre os usos competitivos. Ou seja, é possível avaliar o leque de opções das soluções de compromisso entre os usos ou usuários da água. Contudo, é um método que se aplica à análise de poucos usos (no máximo 3) devido à nossa limitação física para visualizar representações gráficas multidimensionais.

O método das ponderações permite analisar um número maior de usos da água. Contudo, é necessário estabelecer a priori os coeficientes de ponderação entre os usos competitivos, o que introduz um certo grau de subjetividade à análise.

Os resultados obtidos a partir da ponderação com índices econômicos, mostram que a exploração do sistema analisado (São Francisco) deve ser

feita priorizando a água para a irrigação, mesmo ocorrendo perdas na geração de energia elétrica.

O tipo de modelagem proposto pode ser utilizado como uma ferramenta de análise no âmbito do Comitê de Bacia Hidrográfica. Nesse caso, os ponderadores podem ser úteis como indicadores das prioridades para o uso das águas estabelecidas no Plano de Bacia Hidrográfica. Uma vez conhecidas as prioridades e definidos os ponderadores pode-se chegar à solução ótima para utilização dos recursos hídricos da bacia através da modelagem proposta.

Na comparação entre as curvas de Pareto definidas com base em cenários hidrológicos derivados da série histórica e aquelas definidas com base na geração de séries sintéticas, essas curvas são quase coincidentes no caso do cenário seco. Para os cenários mediano e úmido, há uma tendência de subestimação das curvas traçadas com as séries sintéticas em comparação com às traçadas com base nas séries históricas.

A modelagem também pode ser utilizada para avaliação do comportamento do sistema no futuro imediato (horizontes de curto prazo) desde que se utilize como vazões de entrada previsões de aflúncias naturais aos reservatórios.

AGRADECIMENTOS

O autor principal do artigo vem agradecer o CNPq pelo fornecimento de bolsa de estudos que subsidiou a elaboração da tese de doutorado na qual este trabalho está baseado.

REFERÊNCIAS

- ANA, Agência Nacional de Águas. *Resolução no. 145, de 22 de Julho de 2002*. Brasília: Ana, 2002.
- BOX, G.E.P.; JENKINS, G. *Time series analysis, forecasting and control*. San Francisco: Holden-Day, 1976.
- BRANDÃO, J.L.B. *Modelo para operação de sistemas de reservatórios com usos múltiplos*. 2004. 160p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-12042004-111239/>
- BROOKE, A. et al. *GAMS: A User's Guide*. Washington-DC: GAMS Development Corporation, December 1998.
- CHESF, Cia. Hidro Elétrica do São Francisco. Recife. *Demonstrações financeiras de 2002*. Disponível em:

- www.chesf.gov.br/financeira. Acesso em: outubro de 2003.
- CODEVASF, Cia. de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. Brasília. *Projetos de irrigação no vale do São Francisco – fonte de desenvolvimento sustentável do nordeste*. Disponível em: www.codevasf.gov.br/produtos/publicacoes.htm. Acesso em: outubro de 2003.
- HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J.R.; LOUCKS, D.P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance and evaluation. *Water Resources Research*, v.10, n.1, p.14-20, February 1982.
- KELMAN CONSULTORIA. *GESS 2001 – Gerador estocástico de series sintéticas – manual del usuário*. Kelman Consultoria Ltda.: Rio de Janeiro, Maio 2001a.
- KELMAN CONSULTORIA. *GESS 2001 – gerador estocástico de series sintéticas – manual de metodologia*. Kelman Consultoria Ltda.: Rio de Janeiro, Maio 2001b.
- LOPES, J.E.G.; BARROS, M.T.L.; BRANDÃO, J.L.B. *Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco - sub-projeto 4.4: determinação de subsídios para procedimentos operacionais dos principais reservatórios da bacia do São Francisco*. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA, Novembro 2002.
- LOUCKS, D.P.; STEDINGER, J.R.; HAITH, D.A. *Water resources planning and analysis*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 1981.
- MURTAGH, B.A.; SAUNDERS, M.A. *Minos 5.4 user's guide*. Stanford: Systems Optimization Laboratory, Stanford University, February 1995. (Technical Report SOL 83-20R).
- ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Inventário das restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidrelétricos*. Rio de Janeiro: Ons, Novembro 2002a. (RE 3/332/2002).
- ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Diretrizes para as regras de operação de controle de cheias: ciclo 2002/2003*. Rio de Janeiro: Ons Outubro 2002b. (RE 3/229/2002).
- SALAS, J.D. *Analysis and modeling of hydrologic time series*. In: MAIDMENT, D.R. *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill Inc., 1993. p.19.1-19.72.

tool and solved with the MINOS package, which resulted in the SFPLUS model. The case study refers to the reservoir system in the São Francisco River basin, Brazil. The study focuses on system optimization according to the restriction method and the weighting method. The treatment of the stochastic aspects of the problem is also explored. The paper is a summary of the doctoral thesis of Brandão (2004).
Key-words: Optimization; reservoir systems; multiple use.

SFPLUS: Model for Performance Evaluation Of Multiple Use Reservoir Systems

ABSTRACT

This paper is based on the use of Non-Linear Programming optimization models created using the GAMS