

**JOÃO LUIZ BOCCIA BRANDÃO**

**MODELO PARA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE  
RESERVATÓRIOS COM USOS MÚLTIPLOS**

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para a obtenção do Título de  
Doutor em Engenharia.

São Paulo  
2004

**JOÃO LUIZ BOCCIA BRANDÃO**

**MODELO PARA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE  
RESERVATÓRIOS COM USOS MÚLTIPLOS**

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para a obtenção do Título de  
Doutor em Engenharia.

Área de concentração: Engenharia  
Hidráulica

Orientador:  
Prof. Doutor Mario Thadeu Leme de  
Barros

São Paulo  
2004

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Brandão, João Luiz Boccia**

**Modelo para operação de sistemas de reservatórios com usos múltiplos / J.L.B. Brandão. -- São Paulo, 2004.  
160p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.**

**1.Recursos hídricos 2.Sistema de reservatórios (Operação; Otimização) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária II.t.**

*À minha esposa, Dóra, pelo seu  
entusiasmo, incentivo e apoio em  
todos os momentos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Agostinho e Dora, por tudo que eles representam para mim e pelo seu esforço, dedicação e incentivo ao longo da minha formação como ser humano e cidadão.

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Mario Thadeu Leme de Barros pela condução firme e segura destes estudos e pela sua valiosa contribuição nos temas de maior relevância.

Aos professores Kokei Uehara e Rubem La Laina Porto pelo seu estímulo e apoio na iniciação das artes da Hidráulica e da Hidrologia.

Aos amigos e engenheiros João Eduardo Gonçalves Lopes e José Carlos Francisco Palos pelo companheirismo e pelos constantes e profícuos debates técnicos.

Aos colegas do DAEE, EMPLASA e THEMAG pela convivência e troca de idéias ao longo da vida profissional.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão de Bolsa de Estudos para elaboração do presente trabalho de pesquisa.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração deste estudo.

## RESUMO

Este trabalho trata do desempenho dos sistemas de reservatórios segundo a ótica dos usos múltiplos da água. Dado que em muitos sistemas há uma competição pela água entre os diversos setores usuários, esse tipo de enfoque leva inevitavelmente à determinação de regras para partilha da água. O trabalho de pesquisa é fundamentado no uso de modelos de otimização de Programação Não-Linear criados com a ferramenta GAMS e resolvidos com o pacote de otimização MINOS, que resultou no modelo **SFPLUS**. O estudo de caso refere-se ao sistema de reservatórios da bacia do rio São Francisco. Numa primeira fase, o estudo enfoca a otimização do sistema segundo dois métodos para análise de usos múltiplos: o método das restrições e o método das ponderações. Na seqüência, faz-se uma exploração sobre as alternativas para tratamento dos aspectos estocásticos do problema. Os principais resultados indicam que o método as restrições é mais fácil e direto de ser aplicado. Explicita claramente os *trade-offs* entre os usos competitivos. Porém, permite a análise de no máximo três usos. Por outro lado, o método das ponderações permite avaliar um número maior de usos. Contudo, é necessário estabelecer a priori os coeficientes de ponderação entre os usos competitivos. Quanto à questão estocástica, para o caso estudado, verifica-se que o número de séries sintéticas geradas não influi significativamente na forma das distribuições de probabilidades das variáveis geradas pelo modelo. Contudo, essas distribuições são sensíveis ao fato de se usar séries históricas ou séries sintéticas, principalmente nos seus extremos. Além disso, o uso de séries sintéticas afeta os resultados da análise de usos múltiplos quando comparados com os resultados obtidos a partir de dados históricos. Espera-se que os resultados produzidos e as análises decorrentes venham a contribuir para aumentar o grau de entendimento sobre o tema nos meios técnicos e acadêmicos e, dessa forma, permitir que futuros desenvolvimentos nessa área possam incluir os aspectos aqui tratados.

## ABSTRACT

This thesis deals with multiple purpose reservoir systems operation and performance. The main aspects are related to trade-off analysis by using non-linear programming optimization models. Therefore, the **SFPLUS** model were developed with the GAMS software and solved by the MINOS package. The case study refers to the São Francisco river basin reservoir system. Initially, some research is done on two methods of formulating the objective function: the restriction method and the weighting method. Secondly, an alternative analysis on the stochastic aspects involving the problem is presented. According to the main results, the restriction method is an easy and direct approach, by which is possible to express the trade-offs very clearly. However, it is not possible to analyze more than three uses. On the other hand, the main advantage of the weighting method is to allow the analysis of greater number of uses. The problem with the weighting method is concerned with the weighting coefficients, which have to be defined previously. Referring to the stochastic aspects, case study results show that the number of inflow series generated synthetically does not affect significantly the probability distributions of the system performance variables calculated by optimization models. However, the shape of those distributions is sensible to the fact of using historical data or synthetic series, mainly for extreme values. Moreover, the use of synthetic series affects multiple-use results when compared to the results generated with historical data. The overall results of this research are meant to improve the knowledge and induce further discussions about the subject among the technical and academical circles.

## SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### LISTA DE SÍMBOLOS

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>16</b>
<b>4.1</b>	<b>Modelagem de Sistemas de Reservatórios .....</b>	<b>17</b>
4.1.1	Função-Objetivo e Objetivos Múltiplos .....	18
4.1.2	Período de Análise e Passo de Cálculo dos Modelos de Operação.....	20
4.1.3	Formulação Geral do Problema .....	21
4.1.4	Enfoque do Problema Visando os Usos Múltiplos da Água .....	24
4.1.5	A Questão da Geração de Hidroeletricidade.....	31
<b>4.2</b>	<b>Tratamento da Questão Estocástica.....</b>	<b>39</b>
4.2.1	Modelos para Geração de Séries Sintéticas .....	40
4.2.2	Metodologia do <i>Software</i> GESS.....	45
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>49</b>
<b>5.1</b>	<b>O Sistema São Francisco.....</b>	<b>49</b>
5.1.1	Características Gerais .....	49
5.1.2	Dados Básicos.....	51
5.1.3	Restrições Operativas .....	54
5.1.4	Demandas para Irrigação .....	55
<b>5.2</b>	<b>Desenvolvimento do Modelo SFPLUS.....</b>	<b>57</b>
<b>5.3</b>	<b>A Ferramenta GAMS .....</b>	<b>63</b>
<b>5.4</b>	<b>Metodologia para Solução de PNL: MINOS.....</b>	<b>66</b>
5.4.1	Solução Ótima Global ou Local .....	67
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DA OPERAÇÃO PARA USOS MÚLTIPLOS .....</b>	<b>70</b>
<b>6.1</b>	<b>Seleção de Cenários Hidrológicos.....</b>	<b>70</b>



<b>6.2</b>	<b>Análise do Armazenamento Inicial dos Reservatórios .....</b>	<b>74</b>
<b>6.3</b>	<b>Análise de Usos Múltiplos: Método das Restrições.....</b>	<b>75</b>
6.3.1	Análise da Influência da Transposição para o Nordeste Setentrional .....	78
6.3.2	Análise dos Armazenamentos dos Reservatórios.....	81
<b>6.4</b>	<b>Análise de Usos Múltiplos: Método das Ponderações .....</b>	<b>83</b>
6.4.1	Análise Econômica .....	87
<b>7</b>	<b>ANÁLISE ESTOCÁSTICA DA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS..</b>	<b>90</b>
<b>7.1</b>	<b>Geração de Séries Sintéticas.....</b>	<b>90</b>
7.1.1	Resultados dos Testes de Hipótese sobre as Séries Históricas.....	91
7.1.2	Funções de Autocorrelação das Séries Históricas.....	93
7.1.3	Parâmetros dos Modelos Estocásticos .....	98
7.1.4	Análise da Correlação Espacial Anual .....	99
7.1.5	Análise da Autocorrelação Anual .....	100
<b>7.2</b>	<b>Resultados da Análise Estocástica.....</b>	<b>101</b>
7.2.1	Comparação com Resultados Obtidos a Partir de Séries Históricas.....	104
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>110</b>
	<b>ANEXO A – SÉRIES DE VAZÕES MÉDIAS MENS AIS.....</b>	<b>118</b>
	<b>ANEXO B - CÓDIGOS DE PROGRAMAÇÃO DO MODELO SFPLUS .....</b>	<b>129</b>
	<b>ANEXO C – RELATÓRIO DE SAÍDA DO MODELO SFPLUS .....</b>	<b>146</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>155</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Representação Esquemática de um Reservatório.....	22
Figura 4.2 – Curva de Troca entre Dois Usos Conflitantes.....	29
Figura 4.3 – Esquema de uma Usina Hidrelétrica.....	32
Figura 5.1 – Bacia do Rio São Francisco.....	50
Figura 5.2 – Esquema Topológico do São Francisco .....	51
Figura 5.3 - Ótimo Local versus Ótimo Global .....	68
Figura 6.1 – Vazões Médias Mês a Mês no Período 1931 a 2001.....	71
Figura 6.2 – Vazões Médias Anuais no Período 1931 a 2000 - Ano Hidrológico Out/Set.....	72
Figura 6.3 – Distribuição Conjunta das Médias Móveis de 6 Anos de Vazões Médias Anuais ( $m^3/s$ ).....	73
Figura 6.4 – Relação de Troca entre Usos da Água no Sistema São Francisco – Irrigação x Energia – Curvas de Pareto .....	78
Figura 6.5 – Relação de Troca entre Usos da Água no Sistema São Francisco – Irrigação x Energia – Curvas de Pareto – com Transposição .....	80
Figura 6.6 – Trajetória de Armazenamentos – Cenário Seco .....	81
Figura 6.7 – Trajetória de Armazenamentos – Cenário Mediano.....	82
Figura 6.8 – Trajetória de Armazenamentos – Cenário Úmido.....	82
Figura 6.9 – Relação de Troca entre Usos da Água no Sistema São Francisco – Método das Ponderações – Cenário Seco.....	84
Figura 6.10 – Relação de Troca entre Usos da Água no Sistema São Francisco – Método das Ponderações – Cenário Mediano ....	85
Figura 6.11 – Relação de Troca entre Usos da Água no Sistema São Francisco – Método das Ponderações – Cenário Úmido.....	85
Figura 7.1 – Função de Autocorrelação da Série Contínua – Três Marias ..	94
Figura 7.2 – Funções de Autocorrelação Periódicas – Três Marias.....	94
Figura 7.3 – Função de Autocorrelação Parcial da Série Contínua – Três Marias .....	95
Figura 7.4 – Funções de Autocorrelação Parcial Periódicas – Três Marias.	95

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

