JAMES LACERDA MAIA

Técnicas para o gerenciamento quanti-qualitativo de reservatórios com usos múltiplos da água: estudo de caso do reservatório de Barra Bonita - SP.

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

São Carlos

2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M217t

Maia, James Lacerda
Técnicas para o gerenciamento quanti-qualitativo de reservatórios com usos múltiplos da água : estudo de caso do reservatório de Barra Bonita - SP / James Lacerda Maia ; orientador Frederico Fábio Mauad. -- São Carlos, 2009.

Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

1. Gerenciamento ambiental. 2. Reservatórios. 3. Modelos computacionais. 4. Geotecnologias. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **JAMES LACERDA MAIA.**

Tese defendida e julgada em 27/07/2009 perante a Comissão Julgadora:

Aprovado

Prof. Dr. **FREDERICO FÁBIO MAUAD (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Alexandre Augusto Barbosa — APROVADO

Prof. Dr. **ALEXANDRE AUGUSTO BARBOSA**
(Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI)

José Paulo Soares de Azevedo — APROVADO

Prof. Dr. **JOSÉ PAULO SOARES DE AZEVEDO**
(Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ)

Aprovado

Prof. Dr. **CARLOS NOBUYOSHI IDE**
(Universidade Federal do Mato Grosso do Sul/UFMS)

Liliane Lazzari Albertin — aprovado

Drª. **LILIANA LAZZARI ALBERTIN**
(Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior/CAPES/Pós-doutorando)

Prof. Dr. **VICTOR EDUARDO LIMA RANIERI**
Suplente do Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Ciências da Engenharia Ambiental, em exercício

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

À minha esposa Giselle Queiróz,

e aos meus pais Vera e Silas.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad pela inestimável orientação, respeito e disponibilidade de infra-estrutura do Núcleo de Hidrometria para realização do trabalho.

Aos colegas e técnicos do Núcleo de Hidrometria: Diego Loureiro, Felipe Teixeira, César Dalmo, Ivo, Waldomiro Filho e José Maramarque. Especialmente a colega Liliane Lazzari, pela amizade e colaboração.

Ao Prof. Dr. Evaldo Luiz Gaeta Espíndola pelo apoio nas horas boas e difíceis.

Aos funcionários do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada: Claudete, Nelson, Mara, Regina, Aparecido e Sônia, pelo carinho e amizade conquistados durante estes anos de convivência.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio pesquisa.

Ao CNPq pela bolsa de estudo.

RESUMO

MAIA, J. L**. Técnicas para o gerenciamento quanti-qualitativo de reservatórios com usos múltiplos da água: estudo de caso do reservatório de Barra Bonita-SP.** 2009. 158 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Os aspectos quantitativos regem as práticas de engenharia visando o gerenciamento de reservatórios. Entretanto, a preocupação em relação aos aspectos qualitativos da água tem aumentado, já que um número cada vez maior de reservatórios estão sendo utilizados para vários tipos de usos. No processo de gerenciamento de reservatórios é necessário que se leve em consideração todos os usos que serão beneficiados pelo sistema em questão. Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi o emprego de técnicas computacionais para análise quanti-qualitativa dos usos múltiplos do reservatório de Barra Bonita - SP, realizando simulações computacionais através do modelo MIKE BASIN; propondo e testando um modelo de otimização com programação não-linear baseado no método das restrições e incorporando o uso de geotecnologias para análise espacial (distribuição horizontal) e temporal (sazonalidade) da qualidade da água do reservatório. Selecionou-se o reservatório de Barra Bonita para análise, devido aos usos múltiplos da água (geração de energia, navegação, recreação, turismo e pesca) e a presença de uma eclusa para transposição do desnível entre a jusante da barragem e o reservatório de acumulação da hidrelétrica, o que torna o reservatório uma área de estudo diferenciada. Os resultados das simulações realizadas no modelo MIKE BASIN para avaliar os usos múltiplos do reservatório, demonstraram que o melhor cenário foi o que estabeleceu prioridades iguais para a geração de energia e a navegação. A maximização da geração de energia hidroelétrica, através do modelo de otimização, não prejudicou os outros usos do reservatório (principalmente a navegação) e, mesmo no período seco, a energia média gerada pelo modelo registrou valores acima da energia média real gerada pela Usina Hidrelétrica de Barra Bonita-SP (período de 2001 a 2005). O emprego de geotecnologias (software Surfer) proporcionou boas condições para análise espaço-temporal da qualidade da água, quando aliado ao conhecimento sobre as características e condições do ambiente de estudo. Os dados obtidos em campo, demonstraram que algumas variáveis analisadas, como a condutividade elétrica e a turbidez aumentam significativamente do período seco para o chuvoso, pois estão diretamente relacionados com o aporte de material orgânico e inorgânico. O potencial hidrogeniônico (pH) sofre uma variação muito pequena do período seco para o chuvoso, mas seus valores variam espacialmente, sendo encontrados valores maiores no compartimento da barragem para o período seco, e no final do braço do rio Piracicaba para o período chuvoso. Quanto ao oxigênio dissolvido, este aumenta bastante do período chuvoso para o seco, mas em ambos os períodos as maiores concentrações são encontradas no final do braço do rio Piracicaba – SP. Ressalta-se, que apenas o oxigênio dissolvido (estação seca) não se enquadrou no padrão da Resolução CONAMA Nº 357/2005, para águas de classe II.

Palavras-chave: gerenciamento ambiental, reservatórios, modelos computacionais, geotecnologias.

ABSTRACT

MAIA, J. L**. Techniques for quantitative and qualitative management of reservoirs with multiple uses of water: a case study of the reservoir of Barra Bonita-SP.** 2009. 158 p. Thesis (Doctoral Program) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

The quantitative aspects rule the engineering practices aimed at reservoirs management. However, the concern about the qualitative aspects of water has increased, since a growing number of reservoirs are being used for many kinds of applications. In the process of reservoir management it is necessary to take into consideration all the uses that will benefit from the system itself. Hence, the objective of this study was the use of computational techniques for quantitative and qualitative analysis of the multiple applications of the reservoir of Barra Bonita - SP, performing computer simulations using the model MIKE BASIN, proposing and testing an optimization model with non-linear programming based on the constraint method and incorporating the use of geotechnologies for spatial (horizontal distribution) and time (seasonal distribution) analysis of the reservoir water quality. It was selected the reservoir of Barra Bonita for analysis because of the multiple applications of the water (power generation, navigation, recreation, tourism and fishing) and the presence of a lock for transposition of the gap between the dam downstream and the power plant accumulation reservoir, which makes the reservoir a different area of study. The results of the simulations performed in MIKE BASIN model to evaluate the multiple applications of the reservoir showed that the best scenario was the one in which the priorities were the same for power generation and navigation. The maximization of the hydropower generation through the optimization model, did not impair other uses of the reservoir (mainly navigation) and even in the dry season, the average power generated by the model registered values above the average real power generated by the Hydroelectric Power Plant of Barra Bonita-SP (from 2001 to 2005). The use of geotechnologies (Surfer software) provided good conditions for space-time analysis of water quality when coupled with the knowledge about the characteristics and conditions of the studied environment. The data obtained showed that some variables, such as electrical conductivity and turbidity significantly increase from the dry season to the rainy season, since they are directly related to the supply of organic and inorganic materials. The hydrogen potential (pH) undergoes a very small variation from the dry season to the rainy season, but its values vary spatially, with higher values found in the compartment of the dam during the dry season, and at the end of the arm of the Piracicaba river during the wet season. The dissolved oxygen greatly increases from the rainy season to the dry one, but in both periods the highest concentrations are found at the end of the arm of the river Piracicaba - SP. It is emphasized that only the dissolved oxygen (dry season) did not fit the pattern of CONAMA Resolution Nº 357/2005, to Class II Waters.

Keywords: environmental management, reservoirs, computational models, geotechnologies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo da rede de arcos e nós..... 24
Figura 2 – Conceito do modelo MIKE BASIN..... 25
Figura 3 – Exemplo do editor de séries históricas TSEdit..... 26
Figura 4 – Zonas de armazenamento dos reservatórios..... 28
Figura 5 – Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo..... 58
Figura 6 – Imagem de satélite do reservatório (Google Earth)..... 59
Figura 7 – Precipitação média mensal entre 1939 e 2004 na região do reservatório..... 62
Figura 8 – Complexo de barragens do rio Tietê..... 72
Figura 9 – Eclusa de Barra Bonita..... 73
Figura 10 – Barragem e casa de força da UHE Barra Bonita..... 80
Figura 11 – Série histórica de vazões afluentes médias anuais..... 83
Figura 12 – Série histórica de vazões afluentes médias mensais..... 83
Figura 13 – Rede de fluxo do sistema de recursos hídricos do reservatório de Barra Bonita..... 85
Figura 14 – Definição de duração e déficit de volume no período de falha do sistema..... 91
Figura 15 – Tela de programação do software GAMS..... 97
Figura 16 – Localização dos pontos de amostragens de água..... 101
Figura 17 – Sonda Multiparâmetros de Monitoramento de Qualidade da Água YSI 6820. 103
Figura 18 – Tela de saída dos mapas gerados pelo software Surfer…… 103
Figura 19 – Variação dos volumes armazenados no reservatório – cenário 1..... 105
Figura 20 – Variação dos volumes armazenados no reservatório – cenário 2..... 105
Figura 21 – Variação dos volumes armazenados no reservatório – cenário 3..... 106
Figura 22 – Variação das vazões fornecidas para UHE – cenário 1..... 106
Figura 23 – Variação das vazões fornecidas para UHE – cenário 2..... 107
Figura 24 – Variação das vazões fornecidas para UHE – cenário 3..... 107
Figura 25 – Variação das vazões fornecidas para a eclusa – cenário 1..... 108
Figura 26 – Variação das vazões fornecidas para a eclusa – cenário 2..... 108
Figura 27 – Variação das vazões fornecidas para a eclusa – cenário 3..... 109
Figura 28 – Variação das vazões liberadas – cenário 1..... 109
Figura 29 – Variação das vazões liberadas – cenário 2..... 110
Figura 30 – Variação das vazões liberadas – cenário 3..... 110

Figura 31 – Variação do armazenamento do reservatório..... 114
Figura 32 – Variação do nível d'água..... 115
Figura 33 – Variação dos valores de vazões turbinadas..... 115
Figura 34 – Variação dos valores de vazões vertidas..... 116
Figura 35 – Variação dos valores de vazões liberadas pelo reservatório..... 117
Figura 36 – Variação dos valores de energia gerada pela UHE..... 118
Figura 37 – Localização dos pontos de amostragens de água no reservatório de Barra Bonita..... 120
Figura 38 – Temperatura da água nas estações seca e chuvosa (2006)..... 121
Figura 39 – Condutividade elétrica nas estações seca e chuvosa (2006)..... 121
Figura 40 – Oxigênio dissolvido nas estações seca e chuvosa (2006)..... 122
Figura 41 – Potencial hidrogeniônico (pH) nas estações seca e chuvosa (2006)..... 122
Figura 42 – Turbidez nas estações seca e chuvosa no ano de 2006..... 123
Figura 43 – Temperatura (°C), estação seca..... 124
Figura 44 – Temperatura (°C), estação chuvosa..... 124
Figura 45 – Condutividade elétrica (µS/cm), estação seca..... 125
Figura 46 – Condutividade elétrica (µS/cm), estação chuvosa..... 126
Figura 47 – Oxigênio dissolvido (% de saturação), estação seca..... 126
Figura 48 – Oxigênio dissolvido (% de saturação), estação chuvosa..... 127
Figura 49 – Potencial hidrogeniônico, estação seca..... 128
Figura 50 – Potencial hidrogeniônico, estação chuvosa..... 128
Figura 51 – Turbidez (UNT), estação seca..... 129
Figura 52 – Turbidez (UNT), estação chuvosa..... 129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos métodos de interpolação..... 48
Tabela 2 – Características do reservatório de Barra Bonita..... 61
Tabela 3 – Dados de entrada para o cálculo da evaporação (valores médios mensais)..... 66
Tabela 4 – Dados de entrada para o cálculo da evaporação..... 66
Tabela 5 – Valores da curva de permanência..... 68
Tabela 6 – Vazão mínima anual de "d" meses consecutivos com "T" anos de período de retorno..... 69
Tabela 7 – Vazão mínima anual de 7 dias consecutivos com "T" anos de período de retorno ($Q_{7,T}$)..... 69
Tabela 8 – Características da Eclusa de Barra Bonita..... 73
Tabela 9 – Número de eclusagens realizadas no período de 2004 e 2005..... 74
Tabela 10 – Parâmetros de qualidade da água do ponto TIBB02100..... 77
Tabela 11 – Parâmetros de qualidade da água do ponto TIBB02700..... 77
Tabela 12 – Parâmetros de qualidade da água do ponto TIBT02500..... 78
Tabela 13 – Parâmetros de qualidade da água do ponto PCBP02500..... 78
Tabela 14 – Dados gerais da UHE Barra Bonita, dimensões da barragem e dos vertedores..... 79
Tabela 15 – Polinômios cota x área, cota x volume e polinômios de jusante..... 79
Tabela 16 – Características das unidades geradoras..... 80
Tabela 17 – Armazenamentos meta do reservatório (estação seca)..... 86
Tabela 18 – Armazenamentos meta do reservatório (estação chuvosa)..... 86
Tabela 19 – Área observada para cada cota do reservatório de Barra Bonita..... 87
Tabela 20 – Volume observado para cada cota do reservatório de Barra Bonita..... 87
Tabela 21 – Demandas mensais da UHE..... 88
Tabela 22 – Demandas da eclusa, da vazão ecológica e do rio Tietê..... 88
Tabela 23 – Coordenadas geográficas dos pontos de amostragem de água..... 101
Tabela 24 – Índices de desempenho (cenário 1)..... 111
Tabela 25 – Índices de desempenho (cenário 2)..... 111
Tabela 26 – Índices de desempenho (cenário 3)..... 112
Tabela 27 – Valores médios de todos os fatores analisados (período de 5 anos)..... 118

LISTA DE SÍMBOLOS

h	cota, m
A	área, km^2
V	volume, m^3
D	demanda do usuário, m^3/s
W	quantidade de água a ser extraída, m^3/s
F_p	fator de perda
m	número de reservatórios do sistema
n	número de intervalos de tempo
i	índices para reservatórios (1, 2, ...m)
t	índice para intervalos de tempo (1, 2, ...n)
$QD_{i,t}$	vazão defluente do reservatório i ao longo do intervalo de tempo t em m^3/s
$QC_{i,t}$	vazão de uso consuntivo do reservatório i ao longo do intervalo de tempo t em m^3/s
$QC_{i,t}$	vazão afluente ao reservatório i ao longo do intervalo de tempo t em m^3/s
K	constante para transformação das vazões em volumes
$VF_{i,t}$	volume do reservatório i no fim do intervalo t em m^3
$EV_{i,t}$	volume evaporado a partir do reservatório i durante o intervalo t em m^3
$Am_{i,t}$	área média da superfície do reservatório i ao longo do intervalo t em km^2
TE_i	taxa de evaporação líquida a partir da superfície do reservatório i em mm
$E_{i,t}$	energia gerada pela usina i no intervalo t em MW-médios
g	aceleração da gravidade (m/s^2)
ρ	massa específica da água (kg/m^3)

η_g rendimento médio do gerador

η_t rendimento médio da turbina

η_h rendimento médio do circuito hidráulico

$HB_{i,t}$ queda bruta média mensal (metros) do reservatório i no intervalo de tempo t

$QT_{i,t}$ vazão turbinada (m^3/s) pela usina do reservatório i no intervalo de tempo t

$QV_{i,t}$ vazão vertida (m^3/s) pelo reservatório i no intervalo de tempo t

QAB_t vazão fornecida (m^3/s) pelo sistema de abastecimento no intervalo de tempo t

DAB_t demanda de água (m^3/s) para abastecimento no intervalo de tempo t

$NA_{i,t}$ nível d'água (m) do reservatório i no intervalo de tempo t

$NM_{i,t}$ nível meta do reservatório i (m) no intervalo de tempo t

QCC_i vazão para controle de cheias (m^3/s) a jusante do reservatório i

$QE_{i,t}$ vazão para eclusagem (m^3/s) fornecida pelo reservatório i no intervalo de tempo t

$PRT_{i,t}$ produtibilidade da usina i no mês t em $MW/m^3/s$

PI_i potência instalada da usina i em MW

ID_i índice de disponibilidade de máquinas da usina i

$NJ_{i,t}$ nível d'água (m) a jusante do reservatório i ao longo do intervalo t

a0i.... a4i coeficientes do polinômio cota-volume do reservatório i

b0i.... b4i coeficientes do polinômio cota-vazão defluente do reservatório i

ct_i coeficiente de ponderação para a vazão turbinada para o reservatório i

cv_i coeficiente de ponderação para a vazão vertida para o reservatório i

q_{ef} radiação efetiva sobre a superfície

L calor latente de evaporação

G radiação incidente de onda curta

Rt	radiação no topo da atmosfera
p	proporção entre o número efetivo de horas de brilho solar e o máximo possível
σ	$1{,}19.10^{-7}$ cal(/cm^2) . dia (constante de Stefan-Boltzman)
T	temperatura do ar em Kelvin (K)
U	umidade relativa do ar
e_a	tensão parcial de vapor da água
e_s	tensão de vapor saturado
E_i	evaporação nas condições isotérmicas
w_2	velocidade do vento
$Q_{7,10}$	vazão mínima de sete dias de duração com período de retorno de 10 anos
$\bar{Q}$	vazão média, m^3/s
$\bar{P}$	precipitação média, mm/ano
AD	área de drenagem, km^2
Q_{Ecl}	vazão média mensal consumida nas eclusagens, m³/s
C_{Ecl}	comprimento da eclusa, m
L_{Ecl}	largura da eclusa, m
$D_{Máx}$	desnível entre máximos normais, m
$N_{Mês}$	número médio de eclusagens realizadas mensalmente
x	variáveis não-lineares
y	variáveis lineares
c, d, b_1, b_2, l, u	vetores
A_1, A_2, e A_3	matrizes
F(x)	função escalar contínua
f(x)	vetor de funções contínuas
u	índice de usina: bbo (Barra Bonita)

t	índice de tempo: 1,2,.....,60
em	energia média do sistema ao longo do período de análise
afl(t,u)	vazão natural afluente ao reservatório u no intervalo de tempo t
qtur(t,u)	vazão turbinada pela usina u no intervalo de tempo t
qver(t,u)	vazão vertida pela usina u no intervalo de tempo t
qdfl(t,u)	vazão defluente total da usina u no intervalo de tempo t
quso(t,u)	vazão do uso consuntivo extraída do reservatório da usina u no intervalo de tempo t
vfim(t,u)	volume do reservatório da usina u no final do intervalo de tempo t
named(t,u)	nível d'água médio do reservatório da usina u ao longo do intervalo de t
amed(t,u)	área média do reservatório da usina u ao longo do intervalo de tempo t
naj(t,u)	nível d'água no canal de fuga da usina u ao longo do intervalo de tempo t
a0(u).....a4(u)	parâmetros da curva cota-volume da usina u
s0(u), s1(u)	parâmetros da curva área-volume da usina u
b0(u).....b4(u)	parâmetros da curva-chave do canal de fuga da usina u
h(t,u)	queda bruta da usina u no intervalo de tempo t
k(u)	produtibilidade específica da usina u
ener(t,u)	energia gerada pela usina u no intervalo de tempo t
dt(t)	número de segundos do intervalo de tempo t
pi(u)	potência instalada da usina u
fr(u)	fator de reserva ou índice de disponibilidade de máquinas da usina u
c0(u), c1(u)	parâmetros da equação da vazão turbinada em função da queda da usina u
vmaxesp(t,u)	volume máximo do reservatório da usina u no final do intervalo de tempo t
vmin(u)	volume mínimo do reservatório da usina u
v0(u)	volume inicial do reservatório da usina u

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO..... 17

2. REFERENCIAL TEÓRICO..... 21

2.1. Modelos de Simulação..... 21

2.1.1. Modelo MIKE BASIN..... 24

2.2. Modelos de Otimização..... 30

2.2.1. Formulação geral do problema de otimização..... 34

2.2.2. Problema de otimização incorporando os usos múltiplos da água..... 37

2.2.3. Geração de energia hidroelétrica..... 40

2.3. Modelos conjuntos de simulação e otimização..... 46

2.4. Geotecnologias aplicadas para análise da qualidade da água (Ferramenta Surfer)... 48

2.4.1. Estudos de qualidade da água do reservatório de Barra Bonita..... 49

2.5. Arcabouço Legal..... 51

3. METODOLOGIA..... 58

3.1. Localização e caracterização da área de estudo..... 58

3.1.1. Dados Climatológicos e Hidrológicos..... 61

3.1.2. Usos múltiplos da água do reservatório de Barra Bonita..... 69

3.1.3. Situação dos recursos hídricos do reservatório de Barra Bonita..... 76

3.1.4. Usina hidrelétrica de Barra Bonita..... 79

3.2. Período de análise e seleção de cenários hidrológicos..... 82

3.3. Modelo de rede de fluxo do reservatório de Barra Bonita..... 84

3.3.1. Índices de desempenho do sistema..... 89

3.4. Modelo de otimização para operação de reservatórios..... 92

3.4.1. Características do software GAMS..... 93

3.5. Amostragem dos parâmetros de qualidade da água do reservatório..... 100

4. RESULTADOS..... 104

4.1. Resultados da simulação computacional dos usos múltiplos do reservatório (Modelo MIKE BASIN)..... 104
4.2. Análise dos usos múltiplos do reservatório através do modelo de otimização..... 113
4.3. Análise espaço-temporal dos parâmetros de qualidade da água do reservatório..... 119

5. CONCLUSÕES..... 130

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 133

ANEXOS..... 141

Anexo A – Série de vazões médias mensais afluentes ao reservatório de Barra Bonita 142
Anexo B – Níveis de montante e jusante do reservatório de Barra Bonita (2001 a 2005). 143

APÊNDICE..... 148

Apêndice A – Relatório de saída do modelo de otimização (cenário médio)..... 149
Apêndice B – Valores das variáveis de qualidade da água (estações seca e chuvosa)..... 157

1. INTRODUÇÃO

Em várias partes do mundo, períodos prolongados de secas ou de chuvas têm causado grandes prejuízos econômicos e sociais. Apesar de renováveis, os recursos hídricos são limitados e nem sempre suficientes para atender todos os usuários simultaneamente. Com o aumento da demanda, torna-se necessário regulamentar a distribuição deste recurso natural, para evitar conflitos e assegurar o direito de uso da água a todos os cidadãos. Os setores usuários das águas são os mais diversos com aplicação para inúmeros fins, a utilização deste recurso natural pode ter caráter consuntivo, quando a água é derivada do seu curso natural somente retornando em parte e não consuntivo, quando dispensa derivação, mas podendo alterar o regime do curso d'água (MAIA, 2003).

Atualmente prevalece o enfoque do aproveitamento múltiplo das águas, ou seja, sistemas de exploração e controle de recursos hídricos voltados para satisfação das necessidades humanas e das demandas vinculadas às atividades econômicas e sociais.

Nos processos de implantação e operação de reservatórios, que são os elementos comumente utilizados para acumulação e controle da água, é necessário que se leve em conta todos os usos concorrentes que serão beneficiados pelo sistema em questão. 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. É nessa função que a análise de sistemas e a pesquisa operacional têm contribuído para o desenvolvimento de metodologias e técnicas que têm sido aplicadas aos modelos de análise de sistemas de reservatórios, dentre as quais destacam-se: as técnicas de análise custo-benefício; os modelos de simulação digital; os modelos de otimização com programação matemática (linear, não-

linear, dinâmica, etc); os modelos de rede de fluxo e as técnicas de modelagem de bancos de dados (BRANDÃO, 2004).

Os aspectos quantitativos regem as práticas de engenharia visando o gerenciamento de reservatórios. Esses sistemas têm sido construídos objetivando assegurar a disponibilidade de água e esse requisito tem sido a principal preocupação para sua operação. Entretanto, a preocupação em relação aos aspectos qualitativos da água tem aumentado, já que cada vez mais, os reservatórios estão sendo utilizados para vários tipos de usos, como o reservatório de Barra Bonita – SP.

Considerando que a quantidade de água está diretamente relacionada à qualidade da mesma, são necessárias novas abordagens no sentido de atender a ambos os aspectos, que por vezes são excludentes ou conflitantes.

As alterações nas vazões afluentes e as mudanças de qualidade das mesmas acarretam conseqüências diretas sobre a qualidade da água de reservatórios. O volume afluente também afeta a mistura das diferentes camadas existentes no corpo hídrico, podendo acarretar portanto, efeitos positivos ou negativos.

Os efeitos na qualidade da água são os mais diversos, como a contaminação pela dissolução de substâncias orgânicas, minerais e agentes patogênicos, as alterações provocadas pelo lançamento de poluentes e resíduos sólidos, assim como o assoreamento dos corpos d'água em razão da erosão do solo urbano e rural.

Neste contexto, selecionou-se o reservatório de Barra Bonita -SP para análise, devido aos usos múltiplos da água (geração de energia, navegação, recreação, turismo e pesca); por este receber as águas dos rios Piracicaba e Tietê – SP; e também, devido à presença de uma eclusa para transposição do desnível entre a jusante da barragem e o reservatório de acumulação da hidrelétrica, o que torna o reservatório uma área de estudo diferenciada.

A eclusa de Barra Bonita é a primeira da Hidrovia Tietê-Paraná. Segundo a AES Tietê, com níveis d'água a jusante da barragem acima do nível 429,70 (m), não há condição de eclusagem e, para tornar possível a navegação no trecho do rio Tietê referente ao reservatório, é necessário que haja um nível d'água de no mínimo 446,5 m, correspondendo a um armazenamento de 1800 hm³, o que representa 53% da capacidade total de armazenamento de água do reservatório.

Todos os usos e problemas relacionados aos recursos hídricos devem ser controlados e gerenciados por meio de políticas, instrumentos e técnicas de gerenciamento que possibilitem seu uso de maneira sustentável em termos quantitativos e qualitativos.

Atualmente, as ferramentas computacionais são de extrema importância para o setor hídrico, onde diversas ferramentas e técnicas podem ser utilizadas para auxiliar na escolha da alternativa que melhor se adapte aos interesses dos usuários, dos gerenciadores e da sociedade em geral.

Assim, os objetivos deste trabalho foram: empregar técnicas computacionais para análise quanti-qualitativa dos usos múltiplos do reservatório de Barra Bonita – SP, realizando simulações computacionais através do modelo MIKE BASIN; propor e testar um modelo de otimização com programação não-linear baseado no método das restrições; e incorporar o uso de geotecnologias para analise espacial (distribuição horizontal) e temporal (sazonalidade) da qualidade da água do reservatório.

Para melhor compreensão deste estudo, seus métodos e resultados, este encontra-se divido em vários capítulos auto-explicativos: o primeiro capítulo é composto pela introdução, justificativa para o trabalho ser realizado e os objetivos do mesmo. No segundo capítulo apresenta-se a fundamentação teórica que embasou conceitualmente a realização do estudo. O capítulo três descreve a área de estudo com suas características e apresenta detalhadamente a metodologia do trabalho. O capítulo quatro compreende a apresentação dos resultados obtidos

na forma de tabelas e gráficos, sendo efetuado em três fases distintas, descritas a seguir: simulação computacional dos usos múltiplos do reservatório; modelo de otimização formulado para o gerenciamento dos recursos hídricos do reservatório e análise espaço-temporal dos parâmetros de qualidade da água.

Finalmente, os capítulos cinco e seis referem-se às conclusões, recomendações e à listagem de referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

Espera-se que as informações reunidas no presente trabalho possam fornecer subsídios ao planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, com destaque para o reservatório de Barra Bonita e que a utilização de diversas técnicas para análise quanti-qualitativa dos recursos hídricos possa ser aplicada a outros reservatórios.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir, é apresentada uma revisão de diversas pesquisas que foram desenvolvidas na área tecnológica para o planejamento e gerenciamento de sistemas hídricos e as considerações de diversos autores sobre o tema. Este referencial teórico segue a seguinte seqüência de apresentação: modelos de simulação; modelos de otimização; modelos conjuntos de simulação e otimização; geotecnologias aplicadas na análise da qualidade da água; e um arcabouço legal para o embasamento legislativo do trabalho.

2.1. Modelos de Simulação

Os modelos de simulação são conjuntos de expressões matemáticas estruturadas em seqüência lógica que descrevem a operação de um sistema no espaço e no tempo. Tem como objetivo representar e reproduzir o comportamento de um sistema, da forma mais detalhada possível e prever o seu comportamento sob determinadas condições, fornecendo informações para avaliar o comportamento do sistema real.

A vantagem da simulação computacional é que esta pode ser aplicada a sistemas complexos e aceitar quaisquer equações de restrição. A grande desvantagem é não oferecer aos usuários a oportunidade de restringir o espaço decisório e, por conseqüência, a solução de problemas é alcançada através do exaustivo processo de tentativa e erro. No entanto, a simulação pode ser associada a técnicas de otimização (AZEVEDO et al., 2002).

Existem vários modelos de simulação para sistemas de recursos hídricos, um deles é o HEC-5 (HEC, 1976) , que foi desenvolvido para fornecer subsídios no dimensionamento e operação de sistema de reservatórios. Um exemplo de aplicação do HEC-5 pode ser visto no

trabalho de Zahed (1984). Um outro modelo de simulação é o *Interactive River Aquifer Simulation* (IRAS), desenvolvido por Loucks et al. (1995). Mauad (2000) analisou os problemas de usos múltiplos no Aproveitamento Hidrelétrico de Alqueva em Portugal, através do modelo de simulação IRAS, considerando que o sistema deveria fornecer água para o consumo urbano e industrial, para irrigação, geração de energia e para o incremento do abastecimento ao Algarve e ao sul da Espanha.

Peixoto (2002) analisou os conflitos gerados no aproveitamento de usos múltiplos da água na Bacia Hidrográfica do rios Sapucaí/Grande no Estado de São Paulo, com a implementação de três pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), através da aplicação do modelo de simulação computacional IRAS, para determinar os índices de desempenho, confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade do sistema de recursos hídricos.

Dyrbak (2000) realizou estudo utilizando o MIKE BASIN para determinar a melhor política operacional de reservatórios na Polônia. O objetivo foi prevenir a ocorrência de cheias, maximizando ao mesmo tempo a oferta de água para abastecimento urbano e irrigação. Os resultados obtidos demonstraram que o modelo foi eficiente para otimizar a regra operacional dos reservatórios.

Larsen et al. (2000) utilizaram o modelo MIKE BASIN para definir os planos e estratégias operacionais em níveis nacional, regional e local, para utilização dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Mun no Nordeste da Tailândia.

Lima (2002) com o auxílio do MIKE BASIN analisou os conflitos entre os usos múltiplos da água na bacia do rio Atibaia, no Estado de São Paulo, tendo apresentado as duas opções de consideração do reservatório. A primeira é a opção “Standard Reservoir” onde o reservatório é considerado como um armazenamento físico e todos os usuários retiram água do mesmo. A segunda é a opção “Allocation Pool Reservoir”, onde o armazenamento principal é dividido em quatro armazenamentos físicos: armazenamento de controle de

inundação; de distribuição comum; armazenamento de conservação; e armazenamento de sedimentos.

Corrêa (2004) abordou a questão do rebaixamento dos níveis da represa Jaguari através da aplicação do software MIKE BASIN. O rio Jaguari é um importante afluente do Paraíba do Sul, no Estado de São Paulo, tem suas águas represadas para geração de energia elétrica e regularização de vazões. Nos últimos anos, constatou-se um crescente rebaixamento dos níveis operacionais da represa e por este motivo foram simulados quatro cenários distintos de usos da água na bacia, onde verificou-se que o problema é real e requer uma intervenção multi-institucional para ser solucionado.

Albertin (2004) avaliou a disponibilidade hídrica quantitativa e qualitativa da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim, no Estado de São Paulo, através da aplicação do simulador hidrológico MIKE BASIN. Neste estudo, foi analisado o desempenho do sistema de recursos hídricos, o conflito existente entre os usos múltiplos e a concentração dos parâmetros oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Os resultados indicaram que apesar da quantidade de água ser suficiente para atender às demandas, a geração de energia elétrica está comprometida e a água está se esgotando qualitativamente, evidenciando a necessidade e urgência de se implantar estações de tratamento de esgoto.

Ershadi et al. (2005) também apoiaram-se no MIKE BASIN para realizar o planejamento integrado dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica de Cabul, localizado no sudeste do Afeganistão, onde todas as informações sobre disponibilidades e demandas de água foram organizadas e representadas no referido modelo.

2.1.1. Modelo MIKE BASIN

O MIKE BASIN 2000 é uma representação matemática de sistemas de recursos hídricos que simula a configuração de rios principais e tributários, a hidrologia da bacia no espaço e no tempo e os vários esquemas de demanda de água.

O modelo hidrológico é utilizado como ferramenta para planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos de toda uma bacia hidrográfica ou parte dela. O sistema de recursos hídricos é representado por uma rede de arcos e nós digitalizada no ambiente do Sistema de Informações Geográficas ESRI ARCVIEW 3.1 permitindo a integração com este sistema de informação geográfica, conforme a Figura 1. Todas as informações relativas à configuração da rede são editadas na tela do computador (ALBERTIN, 2004).

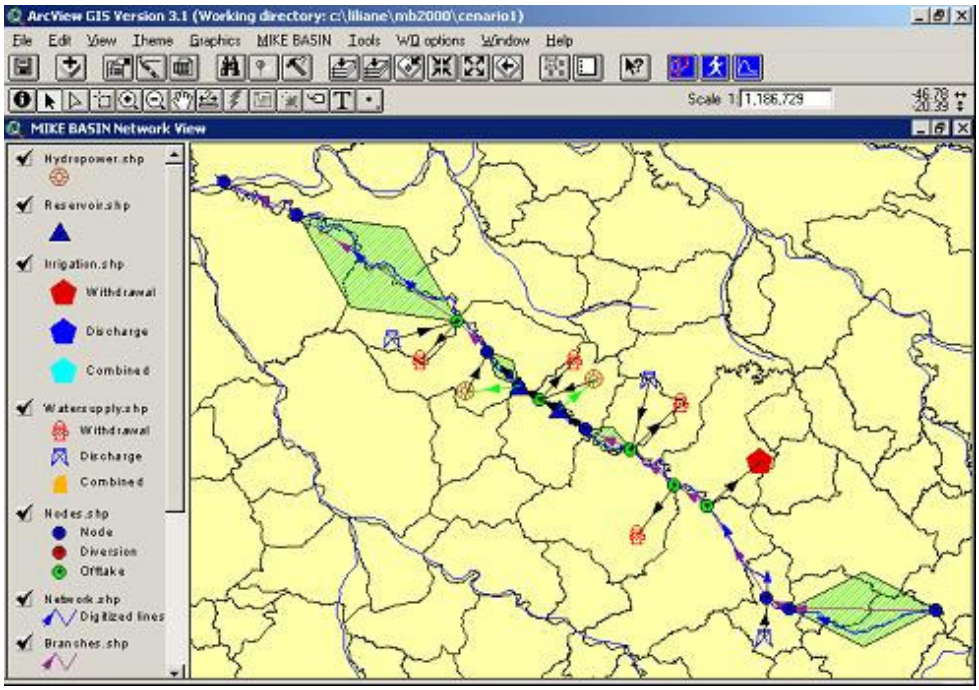


Figura 1 - Exemplo da rede de arcos e nós.
Fonte: ALBERTIN (2004).

Na rede digitalizada, os nós representam locais como nascentes, confluências de rios, postos fluviométricos, pontos de captação, lançamento de águas residuárias e outros pontos de

interesse em estudos hídricos. Os arcos representam rios, canais, linhas de adução, ou seja, trechos de ligação entre os nós do sistema.

O esquema da Figura 2, ilustra os principais dados de entrada e a resposta do modelo de simulação. O conceito matemático do modelo consiste na aplicação de balanço de massa em toda rede e encontra soluções no estado estacionário para cada intervalo de tempo (diário ou mensal).

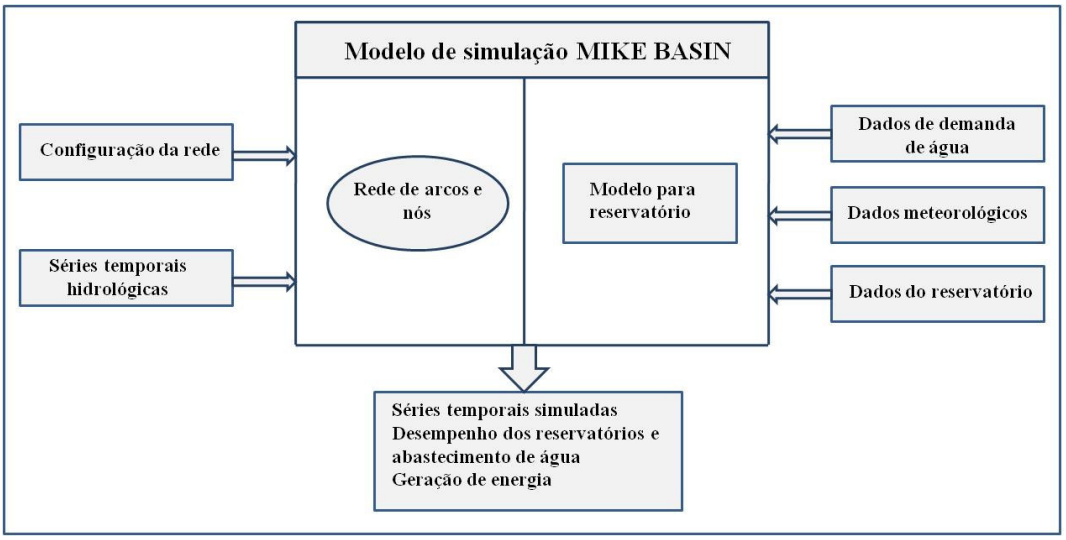


Figura 2 - Conceito do modelo MIKE BASIN.

As séries temporais são inseridas na forma de tabelas, no editor de séries históricas denominado TSEdit, compatível com o Microsoft Excel. A Figura 3 apresenta um exemplo de séries históricas editadas no TSEdit.

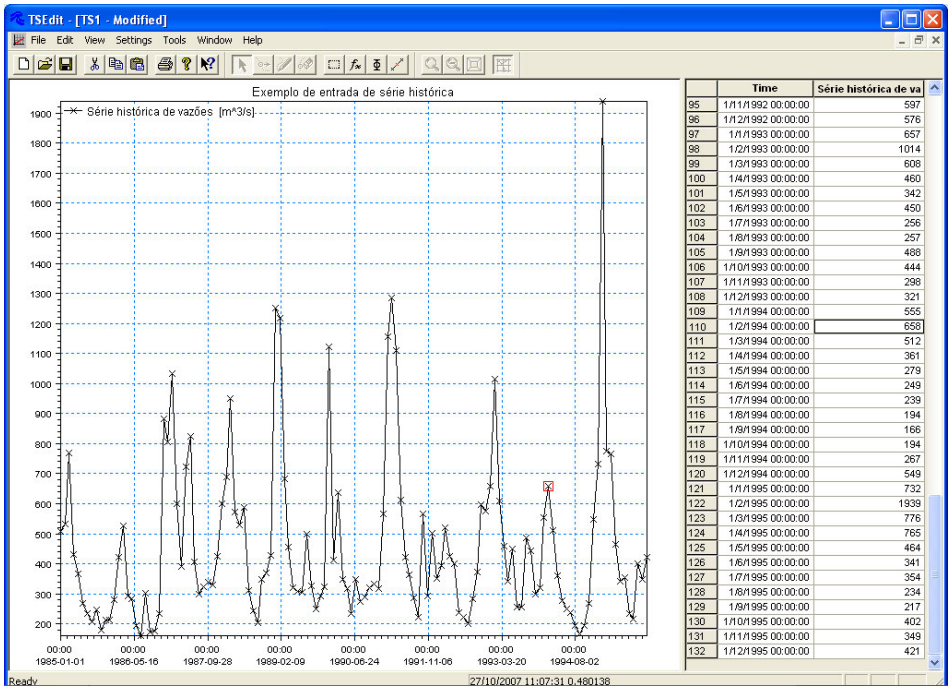


Figura 3 - Exemplo do editor de séries históricas TSEdit.

Freqüentemente, vários usuários recebem água da mesma fonte. Em situações de escassez, o conflito de como distribuir a água disponível entre os usuários é solucionado pelo modelo através de duas alternativas: “Regras de Prioridade Local” e “Regras de prioridade Global”. A opção deve ser definida no início da simulação.

As Regras de Prioridade Local estabelecem que, quando mais de um usuário retira água do mesmo nó, deve-se criar uma relação de prioridade entre eles. O primeiro usuário da lista irá receber, se possível, toda a sua demanda pela água, o segundo usuário irá receber o restante da água, e assim por diante, concluindo que a água não é repartida e o último usuário da lista pode ficar sem água para seu consumo.

Já na Regra de Prioridade Global a água é distribuída de acordo com certas regras que podem afetar qualquer nó do sistema. Por exemplo, pode-se definir uma regra que garanta a demanda de um usuário mais a jusante do rio e nenhum outro usuário irá receber água até que a demanda do primeiro esteja garantida. Várias regras podem ser definidas e cada uma pode ter a sua importância. Os tipos de regras mais usados são: garantir a demanda como

estipulada nas séries temporais dos usuários da água; obrigar um mínimo fluxo em um determinado nó; e armazenar água nos reservatórios em um nível especificado (CORRÊA, 2004).

No sistema em estudo, foi utilizada a Regra de Prioridade Local, pois considera-se que o nó de onde serão atendidas as diversas demandas é o reservatório. A lista de prioridades é alterada a cada cenário, para permitir uma avaliação dos impactos decorrentes das diversas regras operacionais do sistema.

O MIKE BASIN pode simular sistemas de reservatórios destinados aos usos múltiplos da água. O desempenho de políticas operacionais é simulado para cada reservatório, através das curvas de regras operacionais. Estas curvas definem o volume de armazenamento, nível de água e vazão como função do reservatório e do tempo.

Há dois tipos de reservatórios que podem ser modelados pelo MIKE BASIN: "Standard Reservoir" e "Allocation Pool Reservoir". O primeiro considera o reservatório como um único armazenamento físico e todos os usuários captam água do mesmo volume disponível, respeitando uma política operacional. Este modelo foi adotado no sistema em estudo.

O "Allocation Pool Reservoir" tem um armazenamento físico, mas os usuários da água possuem, individualmente, certos volumes de armazenamento destinados a eles e outro volume que tem a finalidade de garantir uma liberação mínima, para sustentabilidade do rio a jusante do reservatório.

As regras de operação que devem ser fornecidas são definidas para várias zonas de armazenamento e podem variar com o tempo (Figura 4).

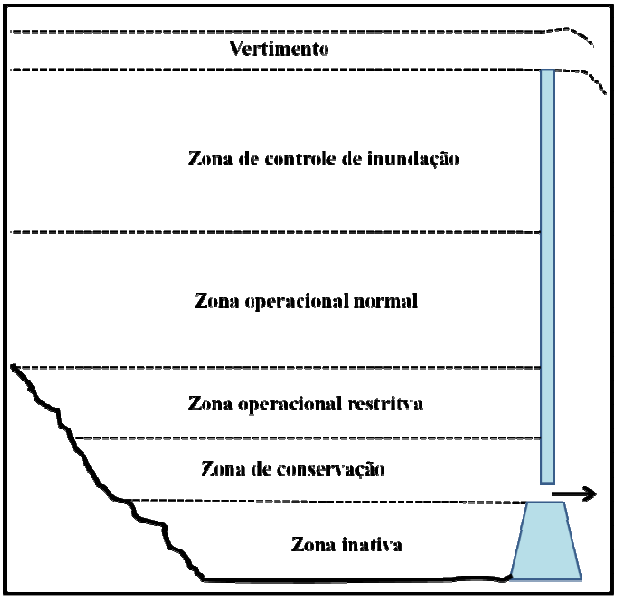


Figura 4 - Zonas de armazenamento dos reservatórios.
Fonte: Adaptado de Guide to Getting Started Tutorial do MIKE BASIN (2000).

- *Zona de controle de inundação:* serve para diminuir o impacto de grandes inundações. Em circunstâncias normais, o nível do reservatório é mantido na zona de controle de inundação para proteger contra enchentes e armazenar água para abastecimento. Se o nível da água estiver nesta zona, a água é liberada segundo uma vazão máxima definida pelo usuário.

- *Zona operacional normal:* reserva de água para todas as demandas.

- *Zona operacional restritiva:* se o nível de água estiver nesta zona, as demandas serão atendidas parcialmente. Em períodos de seca, a liberação do reservatório pode ser reduzida de acordo com uma certa fração definida para cada usuário. Se o reservatório estiver em um nível reduzido 1, a demanda para determinado usuário é reduzida por um fator de redução 1. Se o reservatório estiver em um nível 2 abaixo de 1, a demanda será reduzida por um fator de redução 2.

- *Zona de conservação:* se a água estiver nesta zona, esta apenas será liberada para manutenção da vazão mínima especificada.

- *Zona inativa:* volume morto do reservatório. Apenas evaporação, precipitação e infiltração influenciarão nesta zona.

A curva cota x área x volume deve ser fornecida e o modelo confere se ela obedece a seguinte relação:

$$V(h_{i+1}) \geq V(h_i) + A(h_i).(h_{i+1} - h_i) \quad (1)$$

onde:

h = cota;

A = área;

V = volume.

Durante a simulação, o MIKE BASIN faz interpolações nas curvas e, se houver qualquer resultado fora delas, aparece uma mensagem de erro na execução da simulação.

Dados de precipitação (mm/dia) e evaporação (mm/dia) também são necessários; no caso do sistema estudado, optou-se por fazer uma simplificação, onde constatou-se que a precipitação no reservatório é em média equivalente à evaporação.

Em caso de estiagens, as liberações do reservatório podem ser reduzidas, estas liberações são reduzidas em um determinado fator para cada um dos níveis críticos de água. Os fatores de redução devem ser especificados para cada um dos usuários de jusante.

Para o reservatório padrão, dois fatores devem ser especificados. Os fatores de redução são usados durante a simulação dependendo dos níveis encontrados, de acordo com o especificado na série temporal de controle operacional.

O fator de perda (F_p) deve ser especificado para cada usuário a jusante. Representa as perdas no canal, por evaporação ou infiltração. Esta perda é uma taxa constante, o valor é entre 0 e 1, onde 0 representa ausência de perdas e 1, perda total.

A perda no sistema de abastecimento é compensada pela equação 2:

$$W = \frac{D}{(1 - F_p)} \quad (2)$$

onde:

D = demanda do usuário;

W = quantidade de água a ser extraída do reservatório;

F_p = fator de perda.

Para o abastecimento urbano e industrial, o MIKE BASIN disponibiliza três esquemas: captação; lançamento; e a combinação dos dois. No sistema em estudo, como não existe abastecimento urbano e industrial, usou-se este recurso para captação de água para eclusa de navegação. Os dados de entrada necessários são as séries de demandas em m^3/s.

Os resultados do modelo incluem informação sobre o desempenho individual de cada esquema, como reservatórios e demandas de água. Para o período de simulação, a magnitude e a freqüência de qualquer escassez hídrica podem ser ilustradas. Todos os resultados podem ser visualizados através de séries de dados e, também, serem computadas médias mensais e estatísticas descritivas para qualquer etapa da simulação.

2.2. Modelos de Otimização

Os modelos de otimização são algoritmos matemáticos que procuram identificar os pontos máximos ou mínimos da função objetivo que representa, por meio de uma expressão matemática, os objetivos estabelecidos na operação (BRAGA, 1998).

Yeh (1985) e Wurbs (1993) abordam uma extensa revisão dos diversos modelos de operação e dimensionamento de reservatórios, desenvolvidos para solucionar problemas de gerenciamento de recursos hídricos. Os pesquisadores expõem modelos de otimização como a programação linear (PL), programação não-linear (PNL) e a programação dinâmica (PD). Yeh (1985) faz uma abordagem sobre os tipos de programação, destacando como vantagens da PL: permitir resolver problemas de grande dimensão e existirem pacotes computacionais

consagrados no mercado (Simplex). Quanto à PD, o autor explica que esta é mais adaptável a problemas não-lineares, ao caráter de tomada de decisão seqüencial e aos aspectos estocásticos, característicos da operação de reservatórios. Contudo, os problemas de dimensionalidade, ou seja, quando o número de variáveis de estado cresce de forma excepcional com o número de reservatórios, resultam em grandes dificuldades para aplicação da PD. Em relação a PNL, o autor apontava problemas com estes modelos de programação que atualmente já estão praticamente superados. Esses problemas se referiam basicamente à reduzida capacidade de memória e baixa velocidade de processamento dos computadores.

A programação linear (PL) tem sido umas das técnicas mais aplicadas no gerenciamento de recursos hídricos, apesar de ser limitada para resolver um tipo especial de problema, pois todas as relações entre as variáveis são lineares, tanto na função objetivo como nas funções de restrição.

A aplicação da PL varia desde problemas relativamente simples de alocação direta de recursos até situações complexas de gerenciamento e operação de reservatórios (BRAGA, 1998).

Yen e Chen (2001), através da programação linear, testaram diferentes estratégias de alocação de água para prever oferta e demanda deste recurso em Taiwan para o ano de 2011. O objetivo foi maximizar os benefícios dos usos da água e minimizar o custo a eles relativos, tendo como restrições equações de continuidade, vazões máximas e mínimas atingidas, capacidade dos reservatórios e leis de conservação locais que priorizam os usos com a seguinte prioridade: doméstico, agricultura, produção de energia e industrial. Dotando de dados hidrológicos de 1974 a 1993, os resultados indicaram que em 2011 haverá períodos de seca, devendo ser melhorada a infra-estrutura dos reservatórios e represas.

Nayak et al. (1971) aplicaram o método de PL, no qual a função objetivo era minimizar o custo total do sistema de reservatórios. Hermann (1971) utilizou o método no

dimensionamento e operação de sistemas de vários reservatórios. Becker e Yeh (1974) sugeriram uma solução combinada de PL com PD para determinação da política ótima de operação do subsistema Central Valley Project, na Califórnia, nos Estados Unidos da América. Barbosa (1986) fez a adaptação do mesmo modelo para operação de reservatórios do sistema CESP. Mariño e Mohammadi (1974) estenderam o modelo de Becker e Yeh (1974), que maximiza a geração de energia, considerando também a maximização no abastecimento.

Em outro estudo, Francato e Barbosa (1997) analisaram alguns fatores que podem influenciar os resultados de modelos de otimização de sistemas hidrelétricos. Nesse estudo, foram enfocados aspectos relacionados ao tipo da função-objetivo e à topologia do sistema. As análises foram feitas com base na modelagem dos reservatórios de Emborcação e Itumbiara, localizados no rio Paranaíba.

Em se tratando de PNL, Lopes (2001) apresenta aplicações de PNL para otimização da operação de sistemas hidroenergéticos. Foi analisado o desempenho de diferentes funções objetivo para otimização energética, assim como as regras para deplecionamento de sistemas energéticos com configurações em paralelo e em série. Para configurações em paralelo, o autor sugere que os reservatórios com menor perda de queda por unidade de volume (fator de redução de queda) devam ser esvaziados primeiro. Para sistemas em série, os reservatórios devem ser esvaziados numa seqüência de montante para jusante, exceto quando as diferenças entre os fatores de redução de queda indicarem o contrário. O trabalho foi aplicado no sistema Paranapanema, no Estado de São Paulo.

Um programa que incorpora algoritmos de programação não-linear é o pacote MINOS desenvolvido pelo Laboratório de Otimização de Sistemas da Universidade de Stanford, Califórnia (MURTAGH e SAUNDERS,1995). Peng e Buras (2000) utilizaram o

MINOS para otimização da operação de reservatórios desenvolvendo um modelo através do método implícito para consideração da natureza estocástica das afluências.

Tejada – Guilbert et al. (1990) apresentaram um modelo de programação não-linear para otimização mensal do Califórnia Central Valley Project, nos Estados Unidos da América. Os autores utilizaram o pacote MINOS para o problema não-linear, maximizando o valor econômico da energia gerada a cada mês. Neste trabalho, encontra-se uma discussão interessante sobre a otimização de sistemas não-lineares e da aplicabilidade do MINOS.

Albuquerque et al. (2003) utilizaram a programação não-linear para a operação integrada otimizada de cinco reservatórios, através do modelo ORNAP que opera em nível mensal e permite inferir o comportamento do sistema para vários cenários hidrológicos. A otimização visou à maximização dos benefícios líquidos advindos da agricultura irrigada e da piscicultura, com considerações determinísticas de diferentes cenários de simulação.

Brandão (2004) através de modelos de otimização não-linear resolvidos com o pacote MINOS analisou o sistema de reservatórios da bacia hidrográfica do rio São Francisco. O objetivo foi analisar o uso dos reservatórios para geração de energia e irrigação.

TU et al. (2008) estabeleceram novas regras de operação para um sistema de múltiplos reservatórios no sul de Taiwan transformando um modelo original de programação não-linear de inteiros, para um modelo de programação quadrática de misto-inteiros. Os resultados obtidos demonstraram que a nova regra de operação otimizada melhorou a eficiência da operação dos reservatórios.

Na linha da programação dinâmica (PD), o princípio básico da técnica foi proposto por Bellman (1957). Daí vem o princípio de otimalidade de Bellman.

Kelman et al. (1990) apresentaram a técnica de programação dinâmica estocástica amostral (*sampling stochastic dynamic programing*), que busca modelar a complexa estrutura de correlação espacial e temporal das vazões afluentes aos reservatórios por meio de um

número elevado de amostras de séries temporais de vazão. Braga et al. (1991) apresentaram uma aplicação da programação dinâmica estocástica com enfoque explícito, utilizando-se da técnica *one-at-time*, similar ao artifício de aproximações sucessivas, para se atenuar o "mal da dimensionalidade".

Sylla (1995) utilizou a programação não-linear determinística para formulação de um modelo, com o objetivo de planejar as operações de instalações de recursos hídricos interconectadas, compostas com usinas de geração de energia hidroelétrica. O modelo foi aplicado em um sistema de reservatórios localizados na Bacia Hidrográfica do rio Senegal, na África.

Tendo como base severos eventos de cheias ocorridas em 1995 na Coréia, Shim et al. (2002) aproveitaram os artifícios da programação dinâmica e do Sistema de Informações Geográficas (SIG), para construir um sistema de apoio à decisão que pode ser utilizado de imediato, para controle de cheia de reservatórios destinados a usos múltiplos da água. A função objetivo do modelo foi minimizar fluxos excedentes em pontos controlados da bacia, manter o nível de armazenamento ideal, minimizar rápidas variações da descarga do reservatório, minimizar o excedente do nível do reservatório de forma a não transbordar.

2.2.1. Formulação geral do problema de otimização

Segundo Brandão (2004), o problema de otimização da operação de reservatórios para usos múltiplos pode ser formulado da seguinte maneira:

Maximizar ou minimizar: $$F.O. = \sum_{i=1}^{m} \sum_{t=1}^{n} R_{i,t} \qquad (3)$$

onde:

F.O.: é a função-objetivo, cujas variáveis estão associadas às decisões tomadas para a operação do sistema. Essas variáveis são chamadas de variáveis de decisão.

$R_{i,t}$: é uma função que mede o retorno e/ou desempenho associado ao reservatório *i* no intervalo *t*, conforme os objetivos definidos para esse reservatório.

i = 1, 2,...m (m = número de reservatórios)

t = 1, 2,...n (n = número de intervalos de tempo)

Sujeito a:

Continuidade:

$$VF_{i,t} = VF_{i,t-1} + \left[QA_{i,t} - QD_{i,t} - QC_{i,t}\right] \cdot K - EV_{i,t} \tag{4}$$

Limites de armazenamento:

$$V\min_{i} \leq VF_{i,t} \leq V\max_{i,mês} \tag{5}$$

Limites de defluência:

$$QDmínimo_{,i} \leq QD_{i,t} \leq QDmáximo_{,i} \tag{6}$$

Limites para usos consuntivos:

$$QCmínimo_{,i} \leq QC_{i,t} \leq QCmáximo_{,i} \tag{7}$$

Vazões não negativas:

$$QD_{i,t} \geq 0 \tag{8}$$

onde:

$QD_{i,t}$ = vazão defluente do reservatório *i*, ao longo do intervalo de tempo *t* (variável de decisão) em m^3/s. A defluência é composta por duas parcelas: uma constituída pela vazão controlada (descargas de fundo e/ou vazões turbinadas pela usina hidrelétrica) e outra referente às vazões vertidas pelos órgãos extravasores;

$QC_{i,t}$ = 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 do reservatório *i*, imediatamente a sua montante 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, que é dado por:

$$EV_{i,t} = Am_{i,t} * TE_i * cte. \tag{9}$$

onde:

$Am_{i,t}$ = área média da superfície do reservatório *i* ao longo do intervalo *t*, dada por:

[Ai,t-1 + Ai,t]/2; onde *Ai,t* é função do volume do reservatório *VFi,t;*

TE_i = taxa de evaporação líquida a partir da superfície do reservatório *i* em mm. Geralmente, adota-se um valor médio para cada mês do ano;

cte. = constante de mudança de unidades.

2.2.2. Problemas de otimização incorporando usos múltiplos da água

Existem diversas formas de se considerar os usos múltiplos da água no problema de operação de reservatórios. Em geral, esses usos estão associados a variáveis de decisão, de estado ou a restrições. As variáveis de decisão estão incluídas direta ou indiretamente na função-objetivo. As restrições, via de regra, estão associadas a limitações impostas às variáveis de decisão ou de estado do sistema.

A seguir, são descritas as relações entre alguns dos principais usos da água e o problema de operação de reservatórios, segundo Brandão (2004).

- *Suprimento de água para abastecimento das cidades, indústrias e irrigação:* neste caso, o uso está associado à variável de decisão correspondente à vazão a ser extraída do sistema, para atendimento de uma dada demanda. Pode ser também, um valor fixo, ou seja, uma restrição, caso outros usos sejam alvo de otimização. Um tipo de função-objetivo normalmente empregada nestes casos é a minimização dos desvios quadráticos em relação a uma curva de demanda, que pode ser expressa da seguinte forma:

$$Min \sum_{t=1}^{n} \left(QAB_t - DAB_t \right)^2 \tag{10}$$

onde:

QAB_t = vazão fornecida pelo sistema para abastecimento no intervalo de tempo t;

DAB_t = demanda necessária de água para abastecimento no intervalo de tempo t.

- *Geração de hidroeletricidade:* está associada a duas variáveis de decisão, que são a vazão turbinada e a vazão vertida. O tratamento detalhado deste uso é apresentado no próximo item.

- *Navegação:* sistema de reservatórios, onde há navegação deve ser operado de forma que os níveis d'água mínimos do mesmo e dos trechos fluviais garantam o calado para passagem das

embarcações. Isso em geral, é considerado na forma de restrições, como o valor mínimo a ser atribuído ao nível d'água e/ou à vazão mínima defluente dos reservatórios. Pode também, ser necessário considerar os volumes de água que deixam os reservatórios durante os procedimentos de operação das eclusas. Uma forma de se considerar esse tipo de uso na função-objetivo é através da minimização dos desvios quadráticos em relação a uma curva-guia de operação, como segue:

$$Min \sum_{i=t}^{m} \sum_{t=1}^{n} \left(NA_{i,t} - NM_{i,t} \right)^2 \tag{11}$$

onde:

$NA_{i,t}$ = nível d'água do reservatório *i* no intervalo de tempo *t*;

$NM_{i,t}$ = nível meta do reservatório *i* no intervalo de tempo *t*.

- *Controle de cheias:* via de regra, é considerado nos estudos de operação de reservatórios através da alocação de volumes de espera sazonais para acomodarem cheias de determinada magnitude e assim, poder limitar as descargas a jusante. Na modelagem, é levado em conta através da variação sazonal dos níveis máximos de armazenamento dos reservatórios. Outra maneira de considerar esse uso nos modelos de operação é através da imposição de restrições que limitem superiormente as vazões defluentes dos reservatórios. Para ser incluído na função-objetivo, é também possível minimizar os desvios quadráticos da vazão defluente em relação a um valor limite a partir do qual começam a ocorrer problemas de inundação. Essa função-objetivo pode ser expressa da seguinte forma:

$$Min \sum_{i=t}^{m} \sum_{t=1}^{n} \left(QD_{i,t} - QCC_i \right)^2 \text{ quando } QD_{i,t} > QCC_i \tag{12}$$

onde:

$QD_{i,t}$ = vazão defluente do reservatório *i* no intervalo de tempo *t*;

QCC_i = vazão para controle de cheias a jusante do reservatório *i*.

- *Qualidade da água e preservação ambiental:* no caso dos trechos fluviais, a jusante dos reservatórios, está associada à manutenção de vazões mínimas para garantia de diluição de poluentes, níveis aceitáveis de oxigênio dissolvido, etc. No caso dos lagos, podem ser impostas restrições à variação brusca dos níveis d'água, restrições quanto a níveis d'água muito baixos, de forma a evitar áreas com baixa profundidade, restrições quanto a níveis d'água muito elevados, de forma a evitar prejuízos aos ecossistemas ribeirinhos, etc. Nesse caso, para se levar em conta este uso na função-objetivo, pode-se adotar uma equação análoga à indicada na eq.(11), que busca minimizar os desvios em relação a uma curva-guia de operação. Pode-se também utilizar uma equação análoga à eq.(12), procurando minimizar os desvios quadráticos em relação a uma vazão mínima pré-estabelecida, quando a vazão defluente é inferior a essa restrição.

- *Recreação e lazer:* este uso está relacionado com a imposição de restrições aos níveis d'água máximos e mínimos dos reservatórios. Além disso, esses níveis não devem sofrer oscilações bruscas e/ou acentuadas. Da mesma forma que no uso anterior, pode-se adotar uma função-objetivo do tipo da eq.(11).

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) optou-se por usar neste trabalho o método das restrições. Este método inclui na função-objetivo um único uso, como por exemplo, a geração de energia e considera os outros usos nas equações de restrição. Tomando-se o exemplo já apresentado para a questão da eclusa e da geração de energia, apresenta-se a seguir, o equacionamento do método proposto. Neste caso, busca-se a maximização da energia média e da vazão média para eclusa ao longo do período de análise.

Função-objetivo segundo o método das restrições:

$$Max \ldots \sum_{i=1}^{m} \frac{\sum_{t=1}^{n} E_{i,t}}{n} \text{ com } QE_{i,t} = DE_{i,t} \tag{13}$$

onde:

$QE_{i,t}$ = vazão para eclusa fornecida pelo reservatório *i*, no intervalo de tempo *t*;

$DE_{i,t}$ = demanda para eclusa a ser atendida pelo reservatório *i*, no intervalo de tempo *t*;

$E_{i,t}$ = energia gerada pela usina do reservatório *i*, no intervalo de tempo *t*.

2.2.3. Geração de energia hidroelétrica

Quando um dos usos de um dado sistema é a geração de energia elétrica, o problema de operação de reservatório deve ser complementado pelas funções que regem a produção energética, como segue (BRANDÃO, 2004):

$$E_{i,t} = g.\rho \cdot \eta_g \cdot \eta_t \cdot \eta_h \cdot HB_{i,t} \cdot QT_{i,t} \tag{14}$$

onde:

g = aceleração da gravidade em m/s^2;

ρ = massa específica da água em kg/m^3;

$E_{i,t}$ = 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;

η_g,η_t e η_h = respectivamente, os rendimentos médios do gerador, turbina e circuito hidráulico (adução e restituição). Esses rendimentos, especialmente os da turbina e o do circuito

hidráulico, variam com a vazão turbinada e a queda, contudo para passo de cálculo mensal podem ser considerados constantes;

$HB_{i,t}$ = 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.

A geração de energia elétrica de uma usina está limitada à sua capacidade máxima de geração que é função da sua potência instalada e da disponibilidade de máquinas. Essa disponibilidade pode ser representada por um fator de redução da sua potência instalada denominado *índice de disponibilidade* que engloba as paradas programadas para manutenção e as paradas forçadas.

A vazão turbinada é limitada pelas características da turbina e pela capacidade do gerador. Para cada tipo de turbina há uma geração mínima a ser respeitada, abaixo da qual não é recomendável operá-la. Além disso, quando a queda atinge um determinado valor mínimo, a turbina não consegue produzir sua potência máxima havendo, portanto, uma limitação superior para a vazão turbinada em função da queda. Por fim, caso haja disponibilidade suficiente de queda, há a limitação de geração imposta pela capacidade do gerador, que também se configura com um limite superior para a vazão turbinada.

Outro tipo de defluência que ocorre nas usinas hidrelétricas são os vertimentos pelo extravasor do reservatório. Esses vertimentos são também, variáveis de decisão, uma vez que a vazão defluente total, que é a soma das vazões turbinada e vertida, afeta a queda, em virtude da flutuação do nível d'água do canal de fuga da usina. Além disso, algumas políticas de operação podem indicar o deplecionamento prévio de determinados reservatórios, de forma a abrir espaço para afluências futuras e, dessa forma, otimizar a operação do sistema ao longo do horizonte de estudo. Assim, a vazão defluente total será dada por:

$$QD_{i,t} = QT_{i,t} + QV_{i,t} \tag{15}$$

onde:

$QT_{i,t}$ = vazão turbinada pela usina correspondente ao reservatório *i*, no intervalo *t* em m^3/s;

$QV_{i,t}$ = vazão vertida pela usina correspondente ao reservatório *i*, no intervalo *t* em m^3/s.

A relação entre a vazão defluente e o nível d'água do canal de fuga (nível d'água de jusante) é dada pela curva-chave da usina.

Geralmente, as funções cota-volume, cota-área e as curvas-chave, que envolvem o problema proposto, são não-lineares. No caso das funções em questão, muitas vezes elas atendem às condições de monotonicidade, concavidade e convexidade exigidas pelos diversos algoritmos de PNL. O MINOS exige que essas condições sejam satisfeitas para que tais funções sejam deriváveis, dentro do seu intervalo de utilização.

Na seqüência, apresenta-se o equacionamento do problema de operação de reservatório voltado para a geração de energia elétrica. Neste caso, utiliza-se uma função-objetivo que busca a maximização da energia média gerada ao longo do período de análise.

$$Max \ldots \sum_{i=1}^{m} \frac{\sum_{t=1}^{n} PRT_{i,t} \cdot QT_{i,t}}{n} \tag{16}$$

sendo:

$$PRT_{i,t} = g.\rho \cdot \eta_g \cdot \eta_t \cdot \eta_h \cdot HB_{i,t} \tag{17}$$

onde:

$PRT_{i,t}$ = produtibilidade da usina *i*, no mês *t* em $MW/m^3/s$.

Sujeito a:

- *Continuidade:*

$$VF_{i,t} = VF_{i,t-1} + \left[QA_{i,t} - QT_{i,t} - QV_{i,t} - QC_{i,t}\right] \cdot K - EV_{i,t} \tag{18}$$

Limites de armazenamento:

$$V\min_{i} \leq VF_{i,t} \leq V\max_{i,mês} \tag{19}$$

Capacidade da usina:

$$PRT_{i,t} \cdot QT_{i,t} \leq PI_{i} \cdot ID_{i} \tag{20}$$

Limites para vazões turbinadas:

$$QTmínima_{,i} \leq QT_{i,t} \leq QTmáxima_{,i} \tag{21}$$

Limites para usos consuntivos:

$$QCmínimo_{,i} \leq QC_{i,t} \leq QCmáxima_{,i} \tag{22}$$

Vazões não negativas:

$$QT_{i,t} \text{ e } QV_{i,t} \geq 0 \tag{23}$$

onde:

PI_i = potência instalada da usina *i* em MW;

IDi = 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.

As demais grandezas presentes nas eqs.(16) a (23) já foram descritas ao longo do texto.

A função-objetivo representada na eq.(16) é não-linear, pois $PRT_{i,t}$ é uma função não-linear do volume do reservatório e da vazão defluente. 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 x 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. O setor elétrico brasileiro adota, para representação dessas funções, polinômios de até quarto grau. O equacionamento a seguir demonstra claramente essas questões.

$$PRT_{i,t} = g \cdot \rho \cdot \eta_g \cdot \eta_t \cdot \eta_h \left[\left(NA_{i,t} + NA_{i,t-1} \right) / 2 - NJ_{i,t} \right] \tag{24}$$

$$NA_{i,t} = a0_i + a1_1 \cdot VF_{i,t} + a2_i \cdot VF_{i,t}^2 + a3_i \cdot VF_{i,t}^3 + a4_i \cdot VF_{i,t}^4 \tag{25}$$

$$NJ_{i,t} = b0_i + b1_1 \cdot QD_{i,t} + b2_i \cdot QD_{i,t}^2 + b3_i \cdot QD_{i,t}^3 + b4_i \cdot QD_{i,t}^4 \tag{26}$$

onde:

$NA_{i,t}$ = nível d'água do reservatório *i,* ao final do intervalo *t*;

$NJ_{i,t}$ = nível d'água a jusante do reservatório *i*, ao longo do intervalo *t*;

$a0_i$.....$a4_i$ = coeficientes do polinômio cota-volume do reservatório *i*;

$b0_i$.....$b4_i$ = coeficientes do polinômio cota-vazão defluente do reservatório *i*.

Segundo Lopes et al. (2002), o equacionamento da relação entre a vazão máxima turbinada ($QTmáximo,_i$) e a queda bruta ($HB_{i,t}$) pode também ser representada por uma função polinomial análoga às eqs. (24) e (25).

Na resolução das equações do problema em questão, há um processo iterativo que envolve o cálculo da área média e do nível d'água médio do reservatório, ao longo do intervalo de tempo de cálculo. Para o cálculo dessas variáveis, o modelo deve conhecer os valores da área e do nível d'água no início do passo de cálculo. A solução global do problema de otimização deve atender a essas condições.

Além da função-objetivo apresentada na eq.(16), que visa a maximização da produção energética, existem outras formas de função-objetivo que podem ser empregadas no caso da otimização de sistemas hidrelétricos. Barros et al. (2003), apresentam além da função já citada, mais três formas alternativas para a função-objetivo, como segue:

Minimizar a perda da energia potencial armazenada:

$$Min \ldots \sum_{i=1}^{m} \sum_{t=1}^{n} \left(ct_i \cdot QT_{i,t} + cv_i \cdot QV_{i,t} \right) \tag{27}$$

onde ct_i e cv_i são, respectivamente, os coeficientes de ponderação para a vazão turbinada e a vazão vertida para o reservatório i. Para minimizar vertimentos adota-se um valor alto para cv_i.

Minimizar a soma dos desvios quadráticos dos armazenamentos em relação a volumes-meta:

$$Min \ldots \sum_{i=1}^{m} \sum_{t=1}^{n} \left(VF_{i,t} - T_{i,t} \right)^2 \tag{28}$$

onde: $T_{i,t}$ é o volume-meta para o reservatório i ao final do intervalo t.

Minimizar a energia vertida:

$$Min \ldots \sum_{i=1}^{m} \sum_{t=1}^{n} \left(PRT_{i,t} \cdot QV_{i,t} \right) \tag{29}$$

O tipo de função-objetivo ou combinações destas, deve ser escolhido em função dos aspectos que se pretende analisar com o modelo de otimização. Esses aspectos, em geral, estão relacionados com questões operacionais, como a análise das trajetórias de armazenamento do reservatório, ou com questões relativas à potencialidade energética do sistema, como valores máximos, mínimos e médios de geração ao longo do horizonte de estudo.

2.3. Modelos conjuntos de simulação e otimização

O quadro de otimização e simulação são abordagens utilizadas para o melhor funcionamento das regras de operação para reservatórios. Verhaeghe et al. (1989) propuseram um modelo de simulação associado a técnica de otimização para a operação de reservatórios da bacia do rio Tana, no Kenya. Labadie (1993) descreve uma aplicação combinada entre modelos de simulação e otimização para resolver o problema de operação de um sistema com usos conflitantes. Para tanto, o autor faz uso do software CSUDP, que é uma tentativa de se generalizar um aplicativo de programação dinâmica, e do modelo de rede de fluxo MODSIM. Oliveira (2004) utilizou um modelo de otimização com programação linear para aumentar a geração de energia elétrica, através da maximização da vazão turbinada. A partir dos resultados da otimização da geração de energia, foi utilizado um modelo de simulação para analisar os usos múltiplos do reservatório.

Segundo LIU et al. (2007), em primeiro lugar, o melhor conjunto de dados é obtido através da utilização do método de programação dinâmica determinística para resolver o modelo de otimização. Em segundo lugar, as regras de funcionamento são estabelecidas utilizando a análise estatística dos dados otimizados. Em terceiro lugar, as regras de funcionamento são refinadas por simulação usando o método baseado na otimização. O autor

aplicou este método nas usinas hidroelétricas em cascata no rio Qingjiang, na China, demonstrando que o mesmo funciona bem e realmente pode melhorar as regras de operação.

Uma análise interessante sobre a operação de reservatórios com usos conflitantes é relatada por Martin (1995), onde o autor procura através de técnicas de otimização combinadas com simulação, maximizar a produção energética ao longo do inverno para um sistema de reservatórios no baixo rio Colorado no Texas, sem impactar o propósito de abastecimento público.

Ainda, com relação à operação de sistemas com usos conflitantes, Ponnambalam e Adams (1996) apoiaram-se na otimização estocástica para definir curvas-guia para um sistema de reservatórios voltados para produção energética e irrigação na Índia. Os resultados obtidos a partir da aplicação das regras operativas otimizadas a um modelo de simulação indicaram um ganho no desempenho do sistema.

No contexto do problema de definição de regras operativas de reservatórios, Oliveira e Loucks (1997) utilizaram algoritmo genético para derivar políticas de operação de reservatórios, considerando múltiplos objetivos. Estes apresentaram uma metodologia que gerou um conjunto de políticas operativas testadas num modelo de simulação. As políticas de melhor desempenho foram selecionadas e utilizadas para se definir novas políticas.

Uma referência que relata a integração dos modelos de PL e PD à operação de sistemas de reservatórios é apresentada por Braga et. al. (1998). Os autores desenvolveram o modelo SISCOM, com o objetivo de otimizar a operação do sistema hidroenergético brasileiro.

2.4. Geotecnologias aplicadas para análise da qualidade da água (Ferramenta Surfer)

O uso de geotecnologias pode potencializar a visualização de cenários e tendências relacionadas aos usos múltiplos da água, a análise da heterogeneidade espacial e temporal funcionam como ferramentas de análise auxiliares via softwares como o Surfer, utilizado neste estudo.

Segundo Landim et al. (2002) o Surfer é um pacote de programas gráficos desenvolvido para o cálculo e confecção de mapas e variáveis a partir de dados regularmente distribuídos. A vantagem do Surfer sobre outras ferramentas é o seu tempo de processamento, fácil utilização, compreensão e visualização. O Surfer é uma importante ferramenta, pois usa algoritmos matemáticos para gerar suas curvas. O mapa é construído a partir das posições espaciais de pontos obtidos em campo e são representados pelos valores X, Y e Z, sendo que os dados devem estar georreferenciados. As coordenadas são os valores X, posição do ponto no eixo da ordenada leste-oeste, o Y é a posição na abscissa norte-sul e Z é o valor observado da variável nesse ponto.

Os métodos de interpolação mais utilizados para a confecção de mapas são: Triangulação, Inverso do quadrado da distância, Mínima curvatura e Krigagem. Na Tabela 1 apresenta-se as vantagens e desvantagens de cada um desses métodos. Nesta tabela, o número 1 representa melhor e o número 5 representa pior.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos métodos de interpolação.

Método	**Fidelidade aos dados originais**	**Suavidade das curvas**	**Velocidade de computação**	**Precisão geral**
Triangulação	1	5	1	5
Inverso da distância	3	4	2	4
Mínima Curvatura	4	2	4	3
Krigagem	2	3	5	1

Fonte: Landim (2002).

2.4.1. Estudos de qualidade da água do reservatório de Barra Bonita

Diversos estudos de qualidade da água já foram realizados no reservatório de Barra Bonita, demonstrando que este reservatório é um importante sistema de recursos hídricos. Mas poucos foram os trabalhos que procuraram fazer análises considerando a distribuição espacial do reservatório, formulando mapas que contribuíssem na visualização dessa distribuição. A seguir, são apresentados os trabalhos de alguns autores.

Santos (1996) estudou a dinâmica do fósforo na água do reservatório de Barra Bonita e nos processos que afetam as trocas entre o fundo e a água, ela constatou que a variação de fósforo observada na água e no sedimento e suas relações com outras características da represa, como o estado de trofia e a matéria orgânica eram as razões de liberação de fósforo e fatores controladores desta disponibilização para coluna d'água.

Em seu estudo, Oishi (1997) fez um levantamento dos aspectos geomorfológicos, geológicos e de ocupação do solo da bacia de drenagem do reservatório de Barra Bonita, com o objetivo de avaliar a interação da bacia de drenagem e sua ação sobre o ecossistema aquático. Esta avaliação foi realizada através da análise da água dos diferentes tributários e da correlação com as características da bacia. As coletas foram realizadas mensalmente (março de 1992 a fevereiro de 1993), em nove pontos distribuídos nos principais afluentes da bacia de drenagem do reservatório. Constatou-se que o processo de abertura das comportas da barragem de Barra Bonita influenciou na mudança de alguns parâmetros físico-químicos no ponto 9 (Jusante). A concentração de oxigênio diminuiu, a condutividade aumentou e houve ocorrências de picos das concentrações das formas fosfatadas.

Sandes (1998) realizou um estudo intensivo (10 dias) no reservatório de Barra Bonita com coletas diárias (28 de abril a 07 de maio de 1993), com a finalidade de ampliar os estudos sobre os fatores responsáveis pelo desencadeamento do florescimento de *Microcystis*

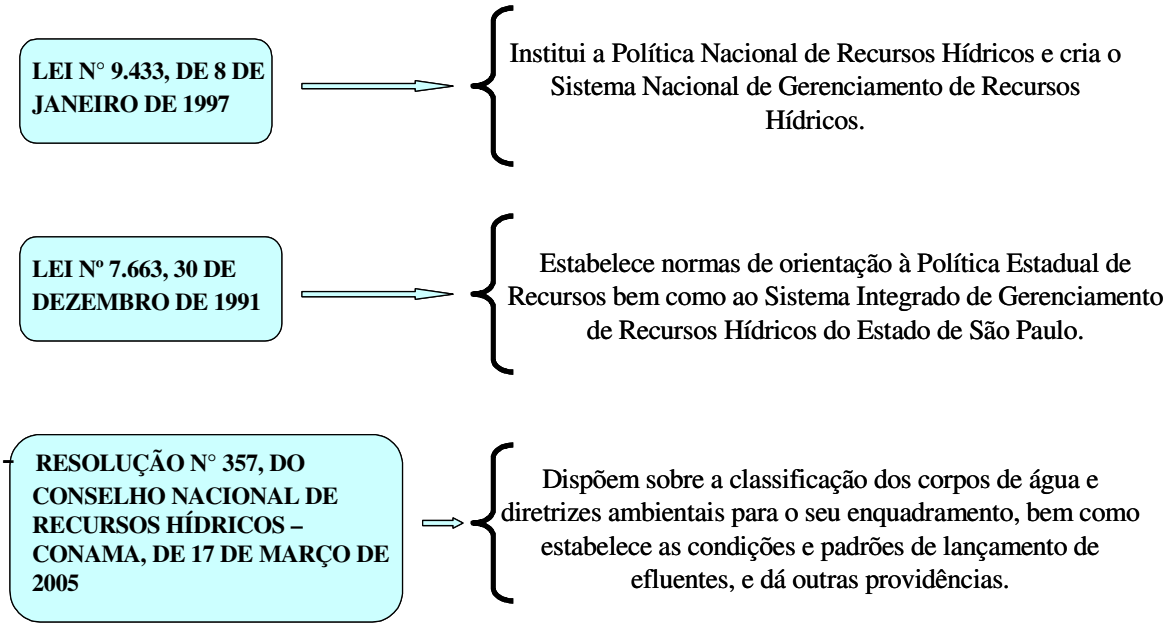
aeruginosa e sobre o conhecimento da flora microbiana associada, em reservatório subtropical. Foram analisadas variáveis climatológicas, hidrodinâmicas, físicas, químicas e biológicas da água e efetuados perfis verticais detalhados até a profundidade de 1,0 m, a fim de se obterem informações da distribuição do florescimento na coluna d'água. Os resultados indicaram que houve um intenso florescimento de cianofíceas do gênero *Microcystis aeruginosa* no reservatório, e que a velocidade e direção do vento associado a outros fatores, como a alta temperatura do ar e alto tempo de residência hidráulica foram determinantes para o florescimento.

Costa (2001) avaliou a qualidade da água e sedimento dos principais tributários do reservatório de Barra Bonita, analisando 14 estações amostrais em um período anual, através de estudos limnológicos e ensaios de toxicidade crônica (utilizando os *cladoceras planctônicos* e *Creiodaphnia dubia* e *Ceriodaphnia silvestri* como organismos-teste). Os resultados das análises físicas e químicas da água e sedimento demonstraram a existência de locais altamente impactados, como os rios Tietê, Capivari, Lavapés e Piracicaba, receptores primários de efluentes domésticos e industriais dos municípios localizados na região.

Rodgher (2001) realizou o monitoramento das variáveis limnológicas (temperatura, pH, condutividade, oxigênio, dissolvido, material em suspensão, clorofila-a, nutrientes totais e dissolvidos) dos reservatórios de Barra Bonita, Bariri, Ibitinga, Promissão, Nova Avanhandava e Três Irmãos. Os resultados obtidos revelaram diferenças na qualidade da água em relação às escalas espacial e temporal (efeitos de fatores climatológicos, hidrodinâmicos e tempo de retenção da água), com elevado aporte de nutrientes pelos rios Tietê e Piracicaba, além da incorporação da sedimentação e da redução de materiais no reservatório de Barra Bonita, promovendo a melhoria da qualidade da água nos demais reservatórios.

2.5. Arcabouço Legal

Em termos de aspectos legais, este trabalho está sendo baseado nas seguintes legislações:



Sobre a Lei Federal N° 9.433 de 08/01/97 foi destacado os seguintes artigos e parágrafos:

- Art. 1º - A Política Nacional de Recursos hídricos baseia-se nos seguintes fundamentos:

III - em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;

- Art. 2º - São objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos:

I - assegurar à atual e as futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos seus respectivos usos.

II - a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável.

- Art. 3º - Constituem diretrizes gerais de ação para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos:

I - a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade.

Art. 9º - O enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água visa:

I - assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que forem destinadas.

Em termos de legislação do Estado de São Paulo, aponta-se alguns pontos fundamentais da Lei Nº 7.663 de 30/12/91:

- Art. 2º - A Política Estadual de Recursos Hídricos tem por objetivo assegurar que a água, recurso natural essencial à vida, ao desenvolvimento econômico e ao bem-estar social, possa ser controlada e utilizada, em padrões de qualidade satisfatórios, por seus usuários atuais e pelas gerações futuras, em todo território do Estado de São Paulo.

- Art. 3º - A Política Estadual de Recursos Hídricos atenderá aos seguintes princípios:

I - gerenciamento descentralizado, participativo e integrado, sem dissociação dos aspectos quantitativos e qualitativos e das fases meteórica, superficial e subterrânea do ciclo hidrológico;

- Art. 4º - Por intermédio do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SIGRH, o Estado assegurará meios financeiros e institucionais para atendimento do disposto nos artigos 205 a 213 da Constituição Estadual e especialmente para:

I - utilização racional dos recursos hídricos, superficiais e subterrâneos, assegurado o uso prioritário para o abastecimento das populações;

II - maximização dos benefícios econômicos e sociais resultantes do aproveitamento múltiplo dos recursos hídricos;

V - desenvolvimento do transporte hidroviário e seu aproveitamento econômico;

- Art. 8º - O Estado, observados os dispositivos constitucionais relativos à matéria, articulará com a União, outros Estados vizinhos e municípios, atuação para o aproveitamento e controle dos recursos hídricos em seu território, inclusive para fins de geração de energia elétrica, levando em conta, principalmente:

I - a utilização múltipla dos recursos hídricos, especialmente para fins de abastecimento urbano, irrigação, navegação, aqüicultura, turismo, recreação, esportes e lazer;

II - o controle de cheias, a prevenção de inundações, a drenagem e a correta utilização das várzeas;

III - a proteção de flora e fauna aquáticas e do meio ambiente.

Finalmente, sobre a Resolução do CONAMA N° 357 de 17/03/05, destacou-se:

- Art. 2° - Para efeito desta Resolução são adotadas as seguintes definições:

IV - ambiente lêntico: ambiente que se refere à água parada, com movimento lento ou estagnado;

V - ambiente lótico: ambiente relativo a águas continentais moventes;

IX - classe de qualidade: conjunto de condições e padrões de qualidade de água necessários ao atendimento dos usos preponderantes, atuais ou futuros;

X - classificação: qualificação das águas doces, salobras e salinas em função dos usos preponderantes (sistema de classes de qualidade) atuais e futuros;

XIV - controle de qualidade da água: conjunto de medidas operacionais que visa avaliar a melhoria e a conservação da qualidade da água estabelecida para o corpo de água;

XX - enquadramento: estabelecimento da meta ou objetivo de qualidade da água (classe) a ser, obrigatoriamente, alcançado ou mantido em um segmento de corpo de água, de acordo com os usos preponderantes pretendidos, ao longo do tempo;

XXVII - parâmetro de qualidade da água: substâncias ou outros indicadores representativos da qualidade da água;

- Art.3° - As águas doces, salobras e salinas do Território Nacional são classificadas, segundo a qualidade requerida para os seus usos preponderantes, em treze classes de qualidade.

Parágrafo único. As águas de melhor qualidade podem ser aproveitadas em uso menos exigente, desde que este não prejudique a qualidade da água, atendidos outros requisitos pertinentes.

- Art. 4° - As águas doces são classificadas em:

I - classe especial: águas destinadas:

a) ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção;

b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e,

c) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.

II - classe 1: águas que podem ser destinadas:

a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;

b) à proteção das comunidades aquáticas;

c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA N° 274, de 2000;

d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e

e) à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.

III - classe 2: águas que podem ser destinadas:

a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;

b) à proteção das comunidades aquáticas;

c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA N° 274, de 2000;

d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e

e) à aqüicultura e à atividade de pesca.

IV - classe 3: águas que podem ser destinadas:

a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado;

b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;

c) à pesca amadora;

d) à recreação de contato secundário; e

e) à dessedentação de animais.

V - classe 4: águas que podem ser destinadas:

a) à navegação; e

b) à harmonia paisagística.

- Art. 7° - Os padrões de qualidade das águas determinados nesta Resolução estabelecem limites individuais para cada substância em cada classe.

- Art. 11° - O Poder Público poderá, a qualquer momento, acrescentar outras condições e padrões de qualidade, para um determinado corpo de água, ou torná-los mais restritivos, tendo em vista as condições locais, mediante fundamentação técnica.

- Art 15 - Aplicam-se às águas doces de classe 2 as seguintes condições e padrões :

I - não será permitida a presença de corantes provenientes de fontes antrópicas que não sejam removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencionais;

II - coliformes termotolerantes: para uso de recreação de contato primário deverá ser obedecida a Resolução CONAMA N° 274, de 2000. Para os demais usos, não deverá ser excedido um limite de 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 (seis) amostras coletadas durante o período de um ano, com freqüência bimestral. A E.coli poderá ser determinada em substituição ao parâmetro coliformes termotolerantes de acordo com limites estabelecidos pelo órgão ambiental competente;

III - cor verdadeira: até 75 mg Pt/L;

IV - turbidez: até 100 UNT;

V - DBO 5 dias a 20°C até 5 mg/L O_2;

VI - OD, em qualquer amostra, não inferior a 5 mg/L O_2;

VII - clorofila a: até 30 µg/L;

VIII - densidade de cianobactérias: até 50000 cel/mL ou 5 mm^3/L; e,

IX - fósforo total:

a) até 0,030 mg/L, em ambientes lênticos; e,

b) até 0,050 mg/L, em ambientes intermediários, com tempo de residência entre 2 e 40 dias, e tributários diretos de ambiente lêntico.

Apesar do Reservatório de Barra Bonita ter sido construído para fins de geração de energia hidroelétrica, hoje constata-se que são feitos múltiplos usos de suas águas, como será detalhado no item 3.1.2. Então, torna-se fundamental analisá-lo sob as condições legais exigentes, enquadrando o reservatório dentro das legislações federal e estadual.

Conforme exposto na legislação descrita acima, em casos de escassez de água a prioridade não poderá ser para a geração de energia e sim para o abastecimento humano e

dessedentação de animais. O gerenciamento do reservatório deve sempre proporcionar o uso múltiplo de suas águas maximizando os benefícios econômicos e sociais. Precisa ser observado também, conforme a legislação, o desenvolvimento do transporte hidroviário e seu aproveitamento econômico e, por final, o gerenciamento sistemático do reservatório sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade de suas águas.

Em se tratando do enquadramento do reservatório em classes segundo os usos preponderantes da água, teoricamente pode-se enquadrar o Reservatório de Barra Bonita como classe IV, que são águas destinadas à navegação e à harmonia paisagística, pois este foi construído com a finalidade de geração de energia hidroelétrica, não requerendo condições de qualidade das suas águas tão exigente. Mas, com visitas ao reservatório para os levantamentos dos dados de campo e fazendo um levantamento sobre o que já foi escrito em relação a este, observa-se, que se faz diversos usos do reservatório mais exigentes em termos de qualidade de suas águas, então para fins de enquadramento e comparação dos dados levantados em campo adotou-se o reservatório como de classe II, que se destina ao abastecimento para consumo humano após tratamento convencional; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, como natação e mergulho; à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas, parques, jardins, campos de esporte e lazer, todas as atividades com os quais o público possa vir a ter contato direto, a aqüicultura e a atividade de pesca.

3. METODOLOGIA

3.1. Localização e caracterização da área de estudo

O reservatório de Barra Bonita está localizado na sub-bacia do Médio Tietê Inferior, uma das sub-bacias integrantes da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos número 10 - Bacia Hidrográfica do rio Sorocaba/Médio Tietê (Figura 5). O seu braço direito está inserido na bacia dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, que influencia bastante na qualidade de suas águas. Apesar de ser formado principalmente pelo barramento dos rios Tietê e Piracicaba, o reservatório conta também com a contribuição de vários outros afluentes como ilustra a Figura 6.

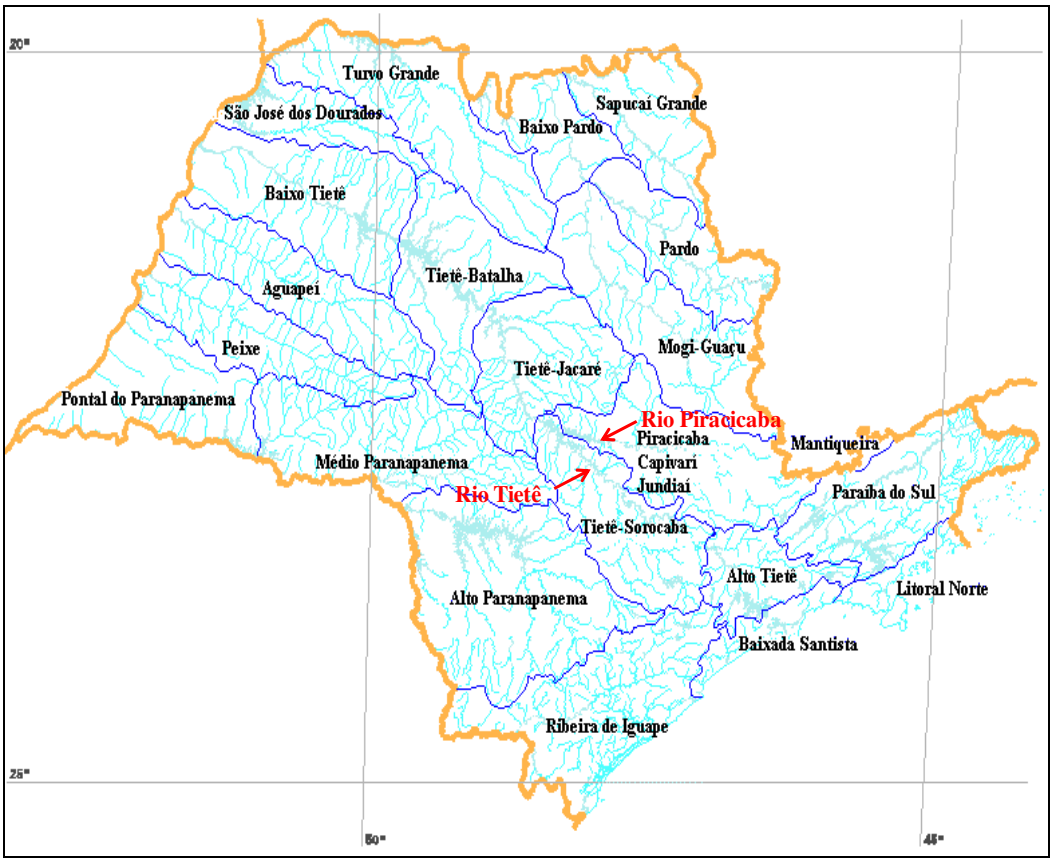


Figura 5 - Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo.
Fonte: (http://www.biotasp.org.br/biodiv/mapas/bacias).

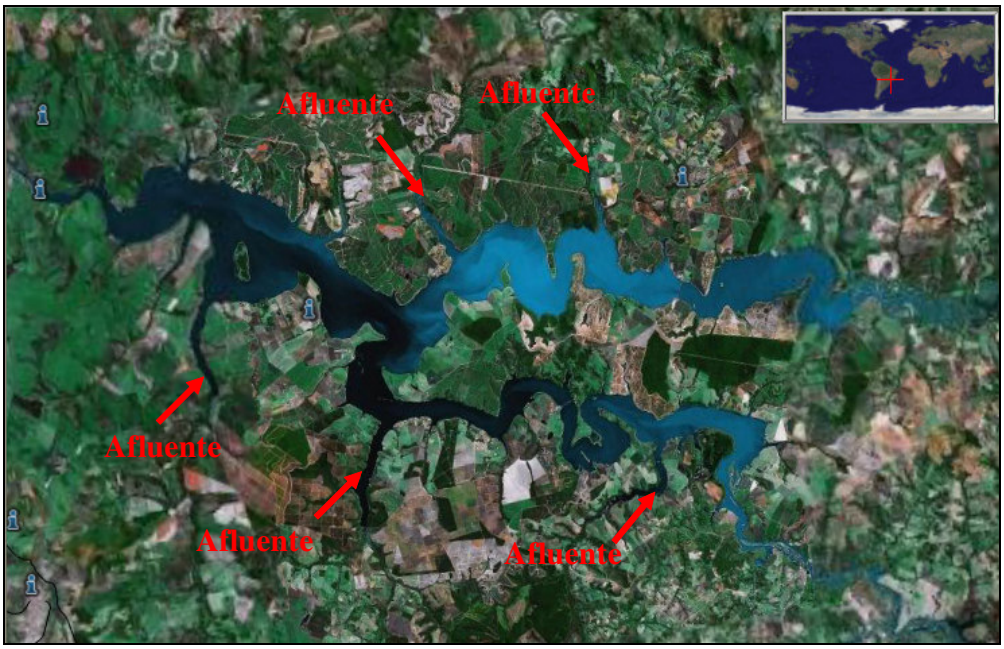


Figura 6 - Imagem de satélite do reservatório (Google Earth, 2006).
Fonte: http://earth.google/com/intl/pt.

A sub-bacia hidrográfica do Médio Tietê Inferior abrange a porção da bacia do Tietê que vai desde a Barragem de Pirapora, passando pela UHE de Rasgão, até o reservatório de Barra Bonita, com 367 km de extensão e área de drenagem de aproximadamente 6.830 km^2. O principal afluente incluído nesta sub-bacia é o rio Sorocaba, na margem esquerda. A bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí é afluente na margem direita.

Segundo o Comitê da Bacia Hidrográfica do Sorocaba/Médio Tietê (2000), a sub-bacia do Médio Tietê Inferior, composta por sete municípios (Anhembi, Bofete, Botucatu, Conchas, Pereiras, Porangaba, Torre de Pedra), que possuem uma população de 168.309 habitantes, segundo o censo do IBGE realizado no ano de 2007. Exceto Botucatu (120.800 habitantes) e Conchas (15.473 habitantes), os demais municípios têm população aproximadamente igual ou inferior a dez mil habitantes, e praticamente todo esgoto é lançado sem tratamento nos corpos d'água receptores. Apenas três municípios têm algum tipo de tratamento, correspondendo a um total de 6,7% de redução da matéria orgânica. A carga orgânica lançada nos corpos d'água receptores é de 7.448 kg $DBO_{5,20}$. De acordo com o

mesmo relatório, cinco indústrias situadas no Médio Tietê Inferior são responsáveis por 86,4% da carga remanescente lançada.

O território abrangido pela UGRHI-10 contém áreas urbanas, vegetação natural, pastagens, reflorestamento, culturas de horta, frutas, milho e cana de açúcar, além da extração e processamento de calcário. As indústrias presentes na região são têxteis, alimentícias, química, mecânica, eletroeletrônica e agroindústrias.

A vegetação predominante na região é a monocultura intensiva de cana, com cerca de 1.140 km^2 de área cultivada, com a presença de uma das maiores indústrias de álcool do mundo, que produz cerca de 1,7 milhão de litros por dia e despeja seus resíduos no rio Tietê, causando grandes impactos a sua jusante (CALIJURI e TUNDISI, 1990).

De acordo com a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2007), com base nas concentrações de fósforo total e clorofila^{-a}, o reservatório de Barra Bonita recebe classificação anual de ambiente eutrófico.

Em relação às características limnológicas, o reservatório apresenta padrão de circulação do tipo polimítico, com curtos períodos de estratificação, encontrando-se em adiantado estado de eutrofização. O tempo médio de retenção das águas é de 30 dias no verão e 6 meses no inverno (TUNDISI e MATSUMURA-TUNDISI, 1990).

Dentre os diversos tributários do sistema, os rios Piracicaba e Tietê são os principais responsáveis pelo estado trófico do reservatório, fornecendo altas cargas de nutrientes e metais através dos despejos domésticos e industriais (OISHI, 1997).

O reservatório de Barra Bonita foi construído para a geração de energia hidroelétrica, porém atualmente é também, utilizado para transporte hidroviário (Hidrovia Tietê-Paraná), turismo, lazer, pesca e como suporte ao desenvolvimento do complexo industrial da região. Na Tabela 2 são apresentadas as principais características do reservatório de Barra Bonita-SP.

Tabela 2 - Características do reservatório de Barra Bonita-SP.

Características do Reservatório	
Condições de Montante	
Área do espelho d'água no nível máximo útil	310 km²
Perímetro	525 km
Volume morto	569 hm³
Volume útil	2.566 hm³
Volume reservado para cheia de projeto	487 hm³
Volume total	3.622 hm³
NA máximo maximorum	453 m
NA máximo útil	451,5 m
NA mínimo	439,5 m
Profundidade máxima	30,2 m
Profundidade média	10,2 m
Condições de Jusante	
NA máximo maximorum	434 m
NA máximo útil	428 m
NA mínimo	426 m
NA crítico da UHE Barra Bonita	435 m
Vazão máxima recomendável	2.000 m³/s

Fonte: AES Tietê (2006).

3.1.1. Dados Climatológicos e Hidrológicos

O clima da região é considerado de transição entre os climas tropical e subtropical. De forma mais específica, segundo Monteiro (1973), a maior parte da área de estudo pode ser classificada quanto aos climas zonais, como climas controlados por massas equatoriais e tropicais. No mês mais quente, a temperatura fica acima dos 22°C e no mês mais frio a

temperatura mínima é inferior a 18°C. De acordo com a classificação de Koppen o clima na região pode ser considerado como CW` (clima mesotérmico, com inverno seco e verão quente).

O inverno é caracterizado por apresentar temperaturas médias diárias que variam de 11°C a 21°C, valores médios de radiação solar variando entre 204 cal/(min.cm²) e 370 cal/(min.cm²), com média de 305 cal/(min.cm²), com dias que praticamente não apresentam insolação, até outros em que esta chega à 10:12 h. Apesar de, neste período os dias apresentarem menos horas de insolação, geralmente são claros e sem nuvens, quando comparados a alguns dias do verão. No mês mais seco (julho), as precipitações são inferiores a 30 mm.

No verão, as temperaturas médias variam de 23°C a 33°C. Os valores de radiação solar variam entre 313 cal/(min.cm²) e 683 cal/(min.cm²), com média de 464 cal/(min.cm²), e as chuvas são abundantes, atingindo valores de até 30 mm/dia. Devido às elevadas temperaturas e à instabilidade do tempo nesta época do ano, dias nublados e abafados são comuns. (CALIJURI,1999). A precipitação anual nesta região chega a atingir uma média de 1300 mm. A precipitação média mensal entre os anos de 1939 e 2004, na região do reservatório encontra-se na Figura 7.

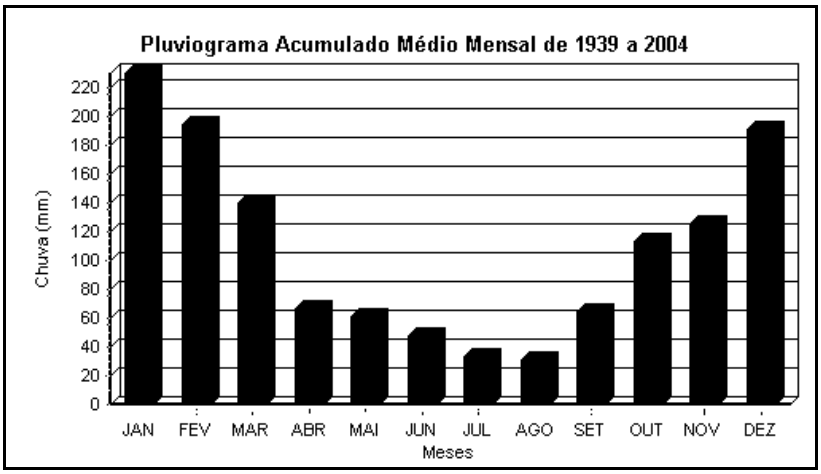


Figura 7 – Precipitação média mensal entre 1939 e 2004 na região do reservatório.
Fonte: DAEE (2006).

- Evaporação no reservatório

A evaporação potencial do reservatório foi estimada por Oliveira (2004) através do Método de Penman, sendo necessárias as seguintes informações para o cálculo:

- Temperatura média (°C);
- umidade relativa do ar (%);
- radiação solar cal/(cm².dia);
- números de horas de incidência solar real;
- velocidade do vento.

Baseada no balanço de energia, a evaporação é determinada através da seguinte expressão:

$$E_0 = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{q_{ef}}{L} + E_i}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \tag{30}$$

onde:

$$\frac{\Delta}{\gamma} = \frac{38640 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T}{237,3+T}}}{(237,3+T)^2} \tag{31}$$

sendo: **T** = temperatura do ar em °C.

Este termo é obtido através de uma variável auxiliar Δ e o parâmetro de Bowen (constante psicrométrica) γ, que vale 0,485 mmHg / °C.

A radiação efetiva sobre a superfície é dada por:

$$\frac{q_{ef}}{L} = \frac{G(1-a) - \sigma \cdot T^4 (0,56 - 0,09 \cdot e_a^{\frac{1}{2}}).(0,1 + 0,9 \cdot p)}{L} \tag{32}$$

onde:

- q_{ef} : é a radiação efetiva sobre a superfície;

- L: calor latente de evaporação.

G é a radiação incidente de onda curta, dada pela expressão:

$$G = Rt \cdot (0{,}24 + 0{,}58 \cdot p) \tag{33}$$

onde:

- Rt: é a radiação no topo da atmosfera;

- p: é a proporção entre o número efetivo de horas de brilho solar e o máximo possível, ou seja:

$$p = \frac{Insolaçãomédia}{Insolaçãomáxima} \tag{34}$$

O termo **a** é o albedo, ou seja, relação entre a luz refletida por superfície e a luz que este recebe do Sol. Para a água, seu valor varia de 3% a 10%, sendo adotado o valor de 3%.

Em seguida:

σ = $1{,}19.10^{-7}$ cal/cm^2 . dia (constante de Stefan-Boltzman);

T = temperatura do ar em Kelvin (K).

A tensão parcial de vapor da água (**e_a**), é dada por:

$$e_a = \frac{U \cdot e_s}{100} \tag{35}$$

onde **U** é a umidade relativa do ar e **e_s** a tensão de vapor saturado, determinada através da expressão:

$$e_s = 4{,}58 \cdot 10^{\frac{7{,}5 \cdot T}{237{,}3+T}} \tag{36}$$

onde:

T = temperatura do ar em °C.

Finalmente, o termo **E_i**, que fornece a evaporação nas condições isotérmicas, é dado por:

$$E_i = 0{,}35 \cdot \left(0{,}5 + \frac{w_2}{160}\right) \cdot \left(e_s - e_a\right) \tag{37}$$

onde **w_2** é a velocidade do vento a 2 metros e **e_s** e **e_a** são dadas pelas equações 36 e 35, respectivamente.

Portanto, prossegue-se ao cálculo da evaporação potencial no reservatório. Os dados de entrada para o cálculo da evaporação são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados de entrada para o cálculo da evaporação (valores médios mensais).

UR (%)	60
T (°C)	24
T (K)	297
Insolação media (h)	7,65
Insolação máxima (h)	12,06
R_t (cal/cm^2 . dia)	433,68
W_2 (m/s)	3,97
W_2 (Km/dia)	343,30
a	3%
σ (W/m^2.K^4)	0,000000119
L (cal/cm^2 . mm)	59

Fonte: Calijuri (1999) apud Oliveira (2004)

Na Tabela 4, tem-se os dados para o cálculo de $\mathbf{E_0}$ que é expresso em mm/dia:

Tabela 4 - Dados para o cálculo de evaporação.

p	0,63
e_s (mmHg)	22,37
e_a (mmHg)	13,42
G cal/(cm^2 . dia)	263,66
Δ/γ	2,76
Q_{ef}/L (mm/dia)	1,91
E_i (mm/dia)	8,29
E_0 (mm/dia)	3,60

Fonte: Calijuri (1999) apud Oliveira (2004)

$$E_0 = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{q_{ef}}{L} + E_i}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad = \quad E_0 = \frac{2{,}76.1{,}91 + 8{,}29}{2{,}76 + 1} \text{ x 365 dias} \tag{38}$$

Portanto, E_0 = 1316 mm/ano

- Fluviometria da área de drenagem do reservatório

As vazões para a área de drenagem do reservatório foram determinadas através do programa de Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo, do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE).

A vazão mínima, bem como sua permanência, é um dos indicadores da disponibilidade hídrica de um local. As vazões mínimas de 7 ou 30 dias apresentam-se de maior interesse para os estudos hídricos, já que uma seqüência de valores baixos representa uma situação realmente desfavorável para a demanda. Para caracterizar a disponibilidade hídrica, estimou-se a vazão mínima de sete dias de duração, com período de retorno de 10 anos, denominada $Q_{7,10}$, que será calculada pela metodologia do programa do DAEE e pode ser matematicamente representada por:

$$Q_{7,10} = C.x_T.(A + B).\bar{Q} \tag{39}$$

onde os parâmetros **C**, $\mathbf{X_T}$, **A** e **B** são tabelados no estudo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo realizado pelo DAEE.

Além da vazão mínima, é importante saber a amplitude de variação das vazões e a freqüência com que determinada vazão ocorre em cada seção do rio. Para isso, usa-se a curva de permanência $Q_{95\%}$.

A vazão média plurianual $\bar{Q}$ multiplicada pela área de drenagem da bacia resulta na seguinte equação:

$$\bar{Q}(l/s) = \left(b + c.\bar{P}\right).AD \tag{40}$$

Os parâmetros **b** e **c** são tabelados, $\bar{P}$ é a precipitação média anual (mm/ano) da área estudada e **AD** é a área de drenagem em km^2. Desta forma, procede-se à determinação destes indicadores de disponibilidade hídrica na região do reservatório.

Com a realização dos cálculos, conclui-se que a vazão média de longo termo é igual a $\bar{Q}$ = 188,13 m³/s. Em seguida, tem-se os resultados da curva de permanência (Tabela 5), a vazão mínima anual de "d" meses consecutivos com "T" anos de período de retorno (Tabela 6) e a vazão mínima anual de 7 dias consecutivos com "T" anos de período de retorno $Q_{7,T}$ (Tabela 7).

Tabela 5 - Valores da curva de permanência de vazões.

P - Permanência(%)	Q - Vazão(m³/s)
5	450,77
10	373,07
15	313,06
20	271,29
25	236,11
30	210,90
40	173,65
50	148,44
60	127,74
70	111,37
75	102,91
80	95,19
85	88,23
90	79,01
95	68,29
100	41,95

Tabela 6 - Vazão mínima anual de "d" meses consecutivos com "T" anos de período de retorno.

T (anos)	d = 1 mês	d = 2 meses	d = 3 meses	d = 4 meses	d = 5 meses	d = 6 meses
10	52,567	56,514	60,462	64,409	68,357	72,305
15	48,907	52,580	56,253	59,925	63,598	67,271
20	46,661	50,165	53,669	57,174	60,678	64,182
25	45,164	48,556	51,947	55,339	58,731	62,122
50	41,255	44,353	47,451	50,549	53,647	56,745
100	38,344	41,223	44,103	46,982	49,862	52,741

Tabela 7 - Vazão mínima anual de 7 dias consecutivos com "T" anos de período de retorno ($Q_{7,T}$).

T (anos)	10	15	20	25	50	100
Q (m^3/s)	39,425	36,680	34,996	33,873	30,941	28,758

3.1.2. Usos múltiplos da água do reservatório de Barra Bonita

Podem surgir problemas e conflitos no gerenciamento de reservatórios que são utilizados para vários usos diferentes. Nesse caso, é necessário encontrar uma solução equilibrada e otimizada, que às vezes poderá sacrificar um dos usos mas melhorar o desempenho do sistema, pois sabe-se que freqüentemente a capacidade de atender às demandas de todos os usos é função de situações específicas, ou seja, função das vazões, níveis d'águas, poluição, entre outros.

Os usos consuntivos da água são aqueles nos quais há perdas entre o que é captado e o que retorna ao curso d'água natural, sendo que estes devem ser considerados na elaboração do balanço entre a disponibilidade e a demanda de água. A seguir, citam-se os usos preponderantes do reservatório de Barra Bonita-SP:

- Abastecimento urbano e industrial

São todos os usos gerados em cidades, vilas e pequenos núcleos urbanos. A demanda urbana de água é constituída pela demanda doméstica, acrescida de outras demandas que se referem às atividades que dão origem ao núcleo urbano, como a indústria o comércio e a prestação de serviços públicos e privados.

Segundo o Comitê de Bacia Hidrográfica do Sorocaba – Médio Tietê (2000), nenhum dos municípios localizados na região do reservatório de Barra Bonita utilizam as águas deste para fins de abastecimento urbano; para este fim, são utilizadas águas de pequenos rios da região e também, águas subterrâneas.

- Irrigação

A irrigação de culturas agrícolas é uma prática utilizada de forma a complementar a necessidade de água, naturalmente promovida pela precipitação, proporcionando teor de umidade ao solo suficiente para o crescimento das plantas.

Segundo o Comitê de Bacia Hidrográfica do Sorocaba – Médio Tietê (2000) e a AES Tietê (2006), o conhecimento sobre o uso da água para irrigação, na região do reservatório de Barra Bonita, ainda é precário.

Os usos não consuntivos da água são aqueles em que retornam à fonte de suprimento, praticamente a totalidade da água utilizada, podendo haver alguma modificação no seu padrão temporal de disponibilidade quantitativa. Existem usos nos quais não ocorre captação ou derivação da água, como a pesca, navegação e o turismo.

A seguir encontra-se os usos não consuntivos do reservatório:

- Geração de energia hidroelétrica

O potencial hidroelétrico de uma região é produto das vazões e das quedas d'água disponíveis e geralmente é aproveitado através da construção de reservatórios de

regularização de vazão e de acumulação, para que se possa ter um maior controle e garantia sobre a geração de hidroeletricidade, pois este tipo de geração de energia é associada a riscos.

A geração de energia hidroelétrica é uma das principais formas de uso não consuntivo da água, sendo também o principal uso do reservatório de Barra Bonita.

A Usina Hidrelétrica de Barra Bonita possui capacidade instalada para utilizar 780 m^3/s de água em suas turbinas na geração de energia hidroelétrica. No entanto, de acordo com a AES Tietê, quem define o quanto de energia será gerada é o Operador Nacional do Sistema (ONS).

- Navegação Fluvial

Segundo o Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT) o sistema hidroviário Tietê-Paraná possui 2.400 km de vias navegáveis de Piracicaba e Conchas (ambos em São Paulo) até Goiás e Minas Gerais (ao norte) e Mato Grosso do Sul, Paraná e Paraguai (ao sul). Liga cinco dos maiores estados produtores de soja do país.

A referida hidrovia já movimenta mais de um milhão de toneladas de grãos/ano, a uma distância média de 700 km. Em seu trecho paulista, a Hidrovia Tietê-Paraná possui 800 km de vias navegáveis, dez eclusas, dez barragens, 23 pontes, 19 estaleiros e 30 terminais intermodais de cargas. Sua infra-estrutura, administrada pelo Departamento Hidroviário, transformou o modal em uma alternativa econômica para o transporte de cargas, além de propiciar o reordenamento da matriz de transportes da região centro-oeste do Estado e impulsionar o desenvolvimento regional de cidades como Barra Bonita e Pederneiras.

A navegação no rio Tietê começou em 1973, com a inauguração da eclusa de Barra Bonita que desenvolveu o turismo regional, seguido em 1981 do transporte regional de cana-de-açúcar, material de construção e calcário, usando a eclusa de Bariri, ao longo de uma

extensão de 300 km. Em 1986, com a inauguração das Eclusas de Ibitinga e Promissão, concluía-se então, a Hidrovia do Álcool.

O complexo de barragens do rio Tietê (Figura 8), é composto por 6 barragens e 8 eclusas, sendo que a seqüência delas são: Barra Bonita, Bariri, Ibitinga, Promissão, Nova Avanhandava (2 eclusas) e Três Irmãos (2 eclusas).

No rio Paraná, há a operação de 4 barragens: Ilha Solteira, Jupiá, Porto Primavera e Itaipu, sendo que somente Jupiá e Porto Primavera possuem eclusa.

Figura 8 – Complexo de barragens do rio Tietê.
Fonte: AES Tietê (www.aestiete.com.br)

Segundo a AES Tietê, empresa operadora da usina, para navegação no trecho do rio Tietê referente ao reservatório de Barra Bonita se tornar possível, é necessário que haja um nível d'água de no mínimo 446,5 m, correspondendo a um armazenamento de 1800 hm³, correspondente a 53% da capacidade total. Portanto, há a possibilidade de conflito entre este fim e a geração de energia pela usina hidrelétrica (UHE), principalmente em períodos de estiagem, sendo este conflito um dos focos deste trabalho.

Deve-se contabilizar também o consumo de água do reservatório pela eclusa. A eclusa de Barra Bonita é a primeira da Hidrovia Tietê-Paraná, através da qual é feita a transposição do desnível de 24 metros entre a vazante do rio Tietê e o reservatório de acumulação da hidrelétrica. Segundo a AES Tietê com níveis d'água a jusante da barragem acima da cota 429,70 (m) não há condição de eclusagem.

A Tabela 8, traz algumas características da eclusa de Barra Bonita, e a Figura 9 apresenta uma vista da eclusa.

Tabela 8 - Características da Eclusa de Barra Bonita-SP.

Características da Eclusa	
Comprimento	147,25 m
Largura	11,76 m
Profundidade Máxima Normal	4 m
Profundidade Mínima Normal	2,5 m
Desnível entre Máximos Normais	24 m
Desnível entre Mínimos Normais	13,5 m
Capacidade de carga	16.200.000 t/ano

Fonte: http://www.adtp.org.br (2007).

Figura 9 - Eclusa de Barra Bonita.
Fonte: http://www.transportes.gov.br (2006).

Na Tabela 9 é apresentado o número de eclusagens para os anos de 2004 e 2005.

Tabela 9 - Número de eclusagens realizadas no período de 2004 e 2005.

Movimentação da Eclusa de Barra de Bonita		
Descrição	**Período**	
	2004	**2005**
N° de Eclusagens	5.121	5.557
N° de Embarcações	7.956	8.605
N° de passageiros	139.575	168.284
Toneladas de Cargas (Soja)	343.714,00	213.268,20
Toneladas de Cargas (Farelo de soja)	200.007,00	164.013,48
Toneladas de Cargas (Areia)	324.450,00	355.890,00
Toneladas de Cargas (Madeira)	0,00	125.126,00
Toneladas de Cargas (Trigo)	0,00	3.400,00
Toneladas de Cargas (Óleo Vegetal)	0,00	0,00
Toneladas de Cargas (Diversos)	758,00	1.185,00
Toneladas de Cargas Total (Ano)	868.929,00	862.882,68

Fonte: AES Tietê (2006).

Segundo Oliveira (2004), a partir dos dados coletados e das dimensões da eclusa, é possível determinar a quantidade média de água consumida para este fim.

$$Q_{Ecl} = \frac{C_{Ecl} \cdot L_{Ecl} \cdot D_{Máx} \cdot N_{Mês}}{86.400 \cdot 30} \tag{41}$$

onde:

Q_{Ecl} = vazão média mensal consumida nas eclusagens (m³/s);

C_{Ecl} = comprimento da eclusa (m);

L_{Ecl} = largura da eclusa (m);

$D_{Máx}$ = desnível entre máximos normais (m);

$N_{Mês}$ = número médio de eclusagens realizadas mensalmente.

Portanto,

$$Q_{Ecl} = \frac{147{,}25 \cdot 11{,}76 \cdot 24 \cdot 227}{86.400 \cdot 30} = 3{,}64 m^3 / s \qquad (42)$$

- Turismo e Recreação

O reservatório de Barra Bonita proporciona, também, a atividade turística para as cidades ao seu entorno, sendo que algumas destas cidades possuem como atividade principal o turismo, que gera desenvolvimento e renda.

O turismo, que já é muito explorado na região de Barra Bonita, pode ao longo da hidrovia, gerar grandes oportunidades de desenvolvimento sócio-econômico com o aparecimento de áreas de lazer, esporte, recreações, marinas e portos turísticos. A Hidrovia Tietê-Paraná, também desponta como nova e exótica oferta turística nacional, sendo que as grandes superfícies de águas dos reservatórios, as extensões de rios em correntes livres, as paisagens naturais e os recursos energéticos privilegiarão além do turismo clássico de lazer e cultural, o ecológico e o fluvial (OLIVEIRA, 2004).

- Pesca

A pesca no reservatório é praticada através da pesca artesanal. Esse tipo de pesca é aquela praticada por formações sócio-econômicas de pequena escala ou como pequena produção mercantil, onde a pesca é a principal atividade exercida, entendida como uma profissão, e cuja principal motivação é a comercialização do pescado, sendo uma parte deste usada para consumo alimentar próprio.

No reservatório pratica-se também a pesca esportiva, cuja finalidade é proporcionar um desenvolvimento turístico e um lazer para as pessoas que possuem casas de veraneio às margens do lago.

- Vazão Ecológica

A vazão ecológica é a demanda necessária de água a manter num rio, de forma a assegurar a manutenção e a conservação dos ecossistemas aquáticos naturais e dos aspectos da paisagem.

A importância da vazão ecológica diz respeito, principalmente à proteção do habitat utilizado pela vida aquática dos corpos d'água. No reservatório de Barra Bonita recomenda-se, segundo a AES Tietê, que seja garantida uma vazão ecológica de 160 m³/s a jusante do reservatório (OLIVEIRA, 2004).

3.1.3. Situação dos recursos hídricos do reservatório de Barra Bonita

Segundo o Comitê de Bacia Hidrográfica do Sorocaba – Médio Tietê (2000), no Estado de São Paulo, observa-se que as situações mais críticas de degradação da qualidade das águas ocorrem na Região Metropolitana de São Paulo (Alto Tietê) e em trechos dos Rios Tietê Médio Superior, Jundiaí, Capivari, Sorocaba e Piracicaba, que recebem cargas muito significativas de esgotos domésticos. Não por acaso, o reservatório de Barra Bonita recebe as águas de todos esses rios, o que torna preocupante a situação dos seus recursos hídricos.

As Tabelas 10 a 13 apresentam os resultados dos parâmetros de qualidade da água do reservatório, em quatro pontos diferentes levantados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) no ano de 2007. Selecionou-se apenas aqueles parâmetros que foram aferidos em campo pelo trabalho.

- Código do Ponto: TIBB02100 (Ano de coleta dos dados: 2007)

- Classe: 2;

- UGRHI: Sorocaba / Médio Tietê;

- Local: Reservatório de Barra Bonita – No meio do corpo central, a jusante da confluência dos braços do Tietê e do Piracicaba.

Tabela 10 - Parâmetros de qualidade da água do ponto TIBB02100.

Descrição do Parâmetro	Unidade	Padrão CONAMA	16/01/07	13/03/07	15/05/07	17/07/07	18/09/07	13/11/07
Parâmetros de campo								
pH	-	entre 6 e 9	7,1	7,2	7,2	7,2	7,6	7,4
Temp. da água	°C		26,8	28,7	23,5	20,5	22,2	24,2
Parâmetros físico-químicos								
Condutividade	µs/cm		188,5	184,3	231	287	325	395
OD	mg/L	mínimo 5	4,21	5,2	6,18	3,21	6,7	3,3
Turbidez	UNT	máximo 100	42,2	3,2	2,74	2,42	-	5,19

Fonte: CETESB (2007).

- Código do Ponto: TIBB02700 (Ano de coleta dos dados: 2007)
- Classe: 2;
- UGRHI: Sorocaba / Médio Tietê;
- Local: Reservatório de Barra Bonita – No meio do corpo central, em direção do Córrego Araquazinho.

Tabela 11 - Parâmetros de qualidade da água do ponto TIBB02700.

Descrição do Parâmetro	Unidade	Padrão CONAMA	16/01/07	13/03/07	15/05/07	17/07/07	18/09/07	13/11/07
Parâmetros de campo								
pH	-	entre 6 e 9	6,9	8,9	7,6	7,1	8	7,1
Temp. da água	°C		26,4	28,6	23,4	20,3	22,7	24
Parâmetros físico-químicos								
Condutividade	µs/cm		214	176,6	203	256	283	335
OD	mg/L	mínimo 5	2,41	8,4	7,58	3,16	0,07	2,33
Turbidez	UNT	máximo 100	27,4	13,39	1,82	4,55	-	4,73

Fonte: CETESB (2007).

- Código do Ponto: TIBT02500 (Ano de coleta dos dados: 2007)

- Classe: 2;

- UGRHI: Sorocaba / Médio Tietê;

- Local: Braço do Rio Tietê – Ponte na rodovia SP-191 que liga Santa Maria da Serra a São Manuel;

Tabela 12 - Parâmetros de qualidade da água do ponto TIBT02500.

Descrição do Parâmetro	Unidade	Padrão CONAMA	16/01/07	13/03/07	15/05/07	17/07/07	18/09/07	13/11/07
Parâmetros de campo								
pH	-	entre 6 e 9	6,8	8,8	7,3	7,4	7,6	7,4
Temp. da água	°C		24,5	29,6	25,3	18,9	21,9	25,9
Parâmetros físico-químicos								
Condutividade	µs/cm		139	247	256	467	497	354
OD	mg/L	mínimo 5	0,4	10,1	4,4	3	4,1	3,8
Turbidez	UNT	máximo 100	132	15,2	7,9	8,14	13,1	16,1

Fonte: CETESB (2007)

- Código do Ponto: PCBP02500 (Ano de coleta dos dados: 2007)

- Classe: 2;

- UGRHI: Capivari / Jundiaí / Piracicaba;

- Local: Braço do Rio Piracicaba – Ponte na rodovia SP-191 que liga Santa Maria da Serra a São Manuel.

Tabela 13 - Parâmetros de qualidade da água do ponto PCBP02500.

Descrição do Parâmetro	Unidade	Padrão CONAMA	09/01/07	13/03/07	08/05/07	18/07/07	26/09/07	28/11/07
Parâmetros de campo								
pH	-	entre 6 e 9	6,9	8,7	7,6	6,8	7,3	7,6
Temp. da água	°C		25,9	30,1	25,9	19	21,2	26,3
Parâmetros físico-químicos								
Condutividade	µs/cm		148	148	191	240	273	225
OD	mg/L	mínimo 5	2,9	9,3	6,9	5,4	6,5	6,5
Turbidez	UNT	máximo 100	79,3	30,9	3,14	8,9	8,1	13,6

Fonte: CETESB (2007).

3.1.4. Usina hidrelétrica de Barra Bonita

A UHE Barra Bonita está localizada na Bacia Hidrográfica do rio Tietê entre os municípios de Barra Bonita e Igaraçu do Tietê. A Tabela 14 apresenta os dados gerais da UHE, barragem e vertedouros. A Figura 10 ilustra a barragem da UHE Barra Bonita juntamente com a casa de força.

Tabela 14 – Dados gerais da UHE Barra Bonita, dimensões da barragem e dos vertedores.

Dados gerais – UHE Barra Bonita	
Produtibilidade específica média	0,008633 MW/(m³/s)/m
Perdas hidráulicas	0,93%
Fator de carga máximo	100%
Fator de carga mínimo	0%
Canal de fuga médio	428,00 m
Vazão média mensal	189 m³/s
Barragem de Concreto	
Comprimento	480 m
Cota do topo	454,5 m
Altura máxima	32,5 m
Vertedouros	
Número de comportas de superfície	5 unidades
Dimensões dos vãos	12,5 m x 9,4 m
Cota da soleira	442,62 m
Cota de topo	451,5 m

Fonte: AES Tietê (2006).

A Tabela 15, apresenta os coeficientes dos polinômios cota x área, cota x volume e os polinômios de jusante.

Tabela 15 – Polinômios cota x área, cota x volume e polinômios de jusante.

Polinômios	**A0**	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**
Cota x área	$-5{,}44524 \times 10^{5}$	$3{,}20666 \times 10^{3}$	-5,10769	$-9{,}73224 \times 10^{-4}$	$5{,}48211 \times 10^{-6}$
Cota x volume	$4{,}32783 \times 10^{2}$	$1{,}49644 \times 10^{-2}$	$-6{,}70741 \times 10^{-6}$	$1{,}75976 \times 10^{-9}$	$-1{,}69822 \times 10^{-13}$
Jusante	$5{,}72298 \times 10^{2}$	$6{,}46108 \times 10^{-2}$	$-2{,}32397 \times 10^{-4}$	$4{,}39038 \times 10^{-7}$	$-3{,}12417 \times 10^{-10}$

Figura 10 - Barragem e casa de força da UHE Barra Bonita. Fonte: Autor (2006)

A seguir, encontra-se na Tabela 16 as características das unidades geradoras.

Tabela 16 - Características das unidades geradoras.

Unidades Geradoras	
Turbinas	
Tipo	Kaplan
Quantidade	4 unidades
Potência nominal (queda de 23 m)	34.800 kW
Queda máxima	25 m
Queda nominal	23,5 m
Queda mínima	12 m
Engolimento nominal	195 m³/s
Vazão turbinada nominal total	712 m³/s
Velocidade nominal	128,6 rpm
Velocidade de disparo	337 rpm
Diâmetro do rotor	4,85 m
Geradores	
Tipo	Umbrela de eixo vertical
Potência nominal unitária	35.190 kW
Potência nominal total instalada	140.760 kW

Fonte: AES Tietê (2006).

- Restrições para operação da UHE Barra Bonita

Segundo o inventário das restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidrelétricos do Operador Nacional do Sistema (ONS) e informações cedidas pela AES Tietê, as restrições operativas do reservatório de Barra Bonita são as seguintes:

- *o nível mínimo para manter a navegabilidade no rio Tietê é de 448,86 m, correspondente a 1.800 hm³ do volume útil; o volume útil 2.566 hm³ será considerado como volume máximo para este estudo; para níveis d'água do reservatório em cotas acima de 452,50 m, as turbinas não podem operar, em virtude da inundação da Casa de Força pela água que pode subir pelo poço da comporta da tomada d'água.*
- *Será permitido um deplecionamento máximo de 20% do volume do reservatório entre períodos consecutivos;*
- *Os valores de vazões turbinadas deverão estar entre 10 m³/s, que é o mínimo exigido para que a geração de energia em cada turbina seja possível, e 780 m³/s, que é o engolimento máximo do sistema considerando as 4 turbinas operando;*
- *Os valores das vazões vertidas não deverão ultrapassar os 4.530 m³/s, que é a capacidade máxima dos vertedores. A vazão vertida mínima (160 m³/s) é solicitada em casos especiais para atender à área de meio ambiente da empresa, visando oxigenar a água, evitando a mortandade de peixes a jusante;*
- *Os valores das vazões liberadas pelo reservatório, deverão estar entre 160 m³/s e 2000 m³/s; vazões defluentes superiores a 1300 m³/s ocasionam formação de ondas, dificultando a navegação; vazões defluentes superiores a 2000 m³/s interrompem a navegação fluvial, por impedimento do funcionamento da eclusa, e causa danos à cidade de Barra Bonita; vazão defluente de 2680 m³/s atinge os vitrôs da Sala de Bombas; vazão defluente de 3800 m³/s começa a inundar a Sala de Bombas, vazão defluente de 3850 m³/s inunda por completo a Sala de Bombas. A taxa de variação*

máxima das defluências é de 10% da vazão horária defluente anterior, para vazões superiores a 1000 m³/s. Com acréscimo de 150 m³/s, o nível do rio sobe de 15 a 20 cm, na cidade de Barra Bonita.

3.2. Período de análise e seleção de cenários hidrológicos

A seleção do período de análise e do intervalo de tempo de cálculo dos modelos de operação de reservatórios depende de uma série de fatores, tais como, as características e os objetivos da modelagem em questão, a disponibilidade de dados de vazão e sua variabilidade temporal, as características das demandas de águas, etc. (BRANDÃO, 2004).

No caso de estudos de planejamento que envolvem usos como geração hidroelétrica, navegação e outros usos associados ao armazenamento da água, o período de análise adotado pode ser de várias décadas ou horizontes com duração de alguns anos. Nesse caso, o passo de cálculo geralmente adotado é o mensal.

O setor elétrico brasileiro adota para o planejamento da operação dos reservatórios modelos que compreendem um período de análise de cinco anos com passo de cálculo mensal e modelos com horizonte de um ano, chegando a discretização semanal para o primeiro mês. Dado que a modelagem desenvolvida neste estudo tem por objetivo abordar questões referentes ao planejamento da operação do reservatório, foi adotado um período de análise de cinco anos e passo de cálculo mensal. Esse horizonte corresponde aproximadamente ao padrão para os estudos de planejamento da operação do setor elétrico.

- Seleção de cenários hidrológicos

O estudo de seleção de cenários hidrológicos foi desenvolvido a partir da série de vazões afluentes ao reservatório de Barra Bonita (Anexo A). Os gráficos das Figuras 11 e 12 apresentam as médias anuais e mensais dessa série no período de 1931 a 2004.

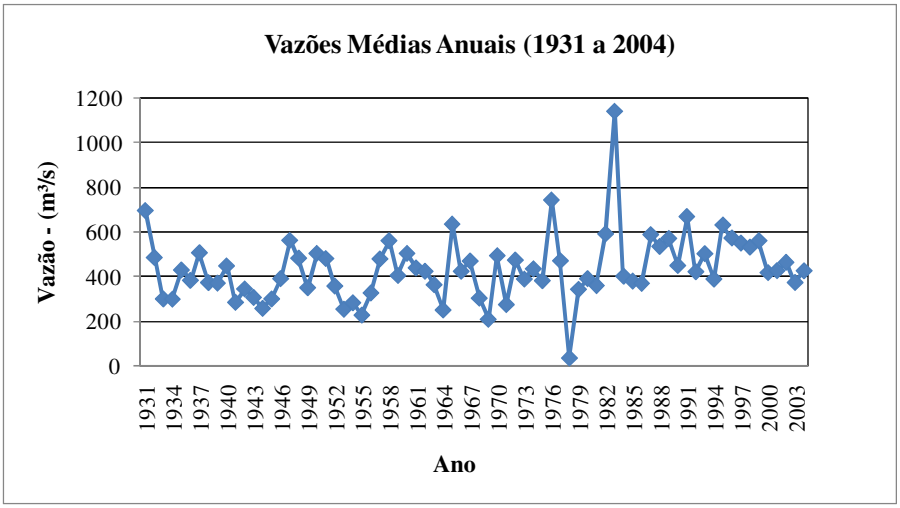


Figura 11 – Série histórica de vazões afluentes médias anuais.
Fonte: Operador Nacional do Sistema - ONS (2006).

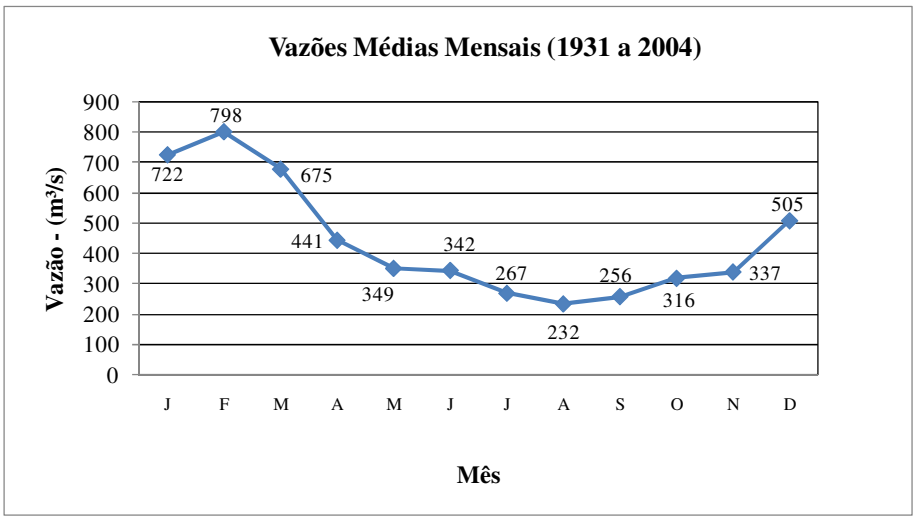


Figura 12 – Série histórica de vazões afluentes médias mensais.
Fonte: Operador Nacional do Sistema - ONS (2006).

Observa-se na Figura 11, que a maior vazão média anual de toda série histórica ocorreu no ano de 1983, com 1137 m³/s; a menor ocorreu no ano de 1969, com 206 m³/s, sendo que a média anual de toda a série histórica foi de 437 m³/s.

Em relação às vazões médias mensais, as maiores vazões ocorreram no mês de janeiro e fevereiro (722 m³/s e 798 m³/s); a menor vazão média ocorreu no mês de agosto, com 232 m³/s. Para as simulações, foi usada a série histórica referente ao período de 1931 a

2004; para a otimização do sistema, foram calculadas as médias móveis de 5 anos consecutivos para essa série de vazões para determinação dos cenários seco, médio e úmido.

- *Cenário seco:* corresponde às vazões médias referentes ao período de outubro de 1941 a setembro de 1946;

- *Cenário médio:* corresponde às vazões médias referentes ao período de outubro de 1959 a setembro de 1964;

- *Cenário úmido:* corresponde às vazões médias referentes ao período de outubro de 1982 a setembro de 1987.

3.3. Modelo de rede de fluxo do reservatório de Barra Bonita

Com o auxílio do modelo MIKE BASIN 2000, desenvolvido pelo Danish Hydraulic Institute, realizou-se as simulações de diferentes cenários para analisar os usos múltiplos da água do reservatório.

Os dados de entrada do modelo consistem em uma série temporal de vazões afluentes ao reservatório, as características de cada nó da rede e suas demandas, os dados que caracterizam o reservatório e as regras operacionais do mesmo.

Um dos principais requisitos para utilização de modelos de planejamento e gestão de recursos hídricos é a quantidade e representatividade das informações sobre o sistema a ser simulado. Fornecer parâmetros autênticos para o modelo é fundamental para permitir resultados confiáveis.

Para confecção do modelo obteve-se dados juntos aos seguintes órgãos: Comitê da Bacia Hidrográfica dos rios Sorocaba/Médio Tietê; Comitê da Bacia Hidrográfica dos rios Piracicaba/Capivari e Jundiaí; Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de São Paulo; Operador Nacional do Sistema (ONS) e na AES Tietê.

A rede de fluxo formulada para o sistema de recursos hídricos é representada pela Figura 13 e os principais componentes do sistema são:

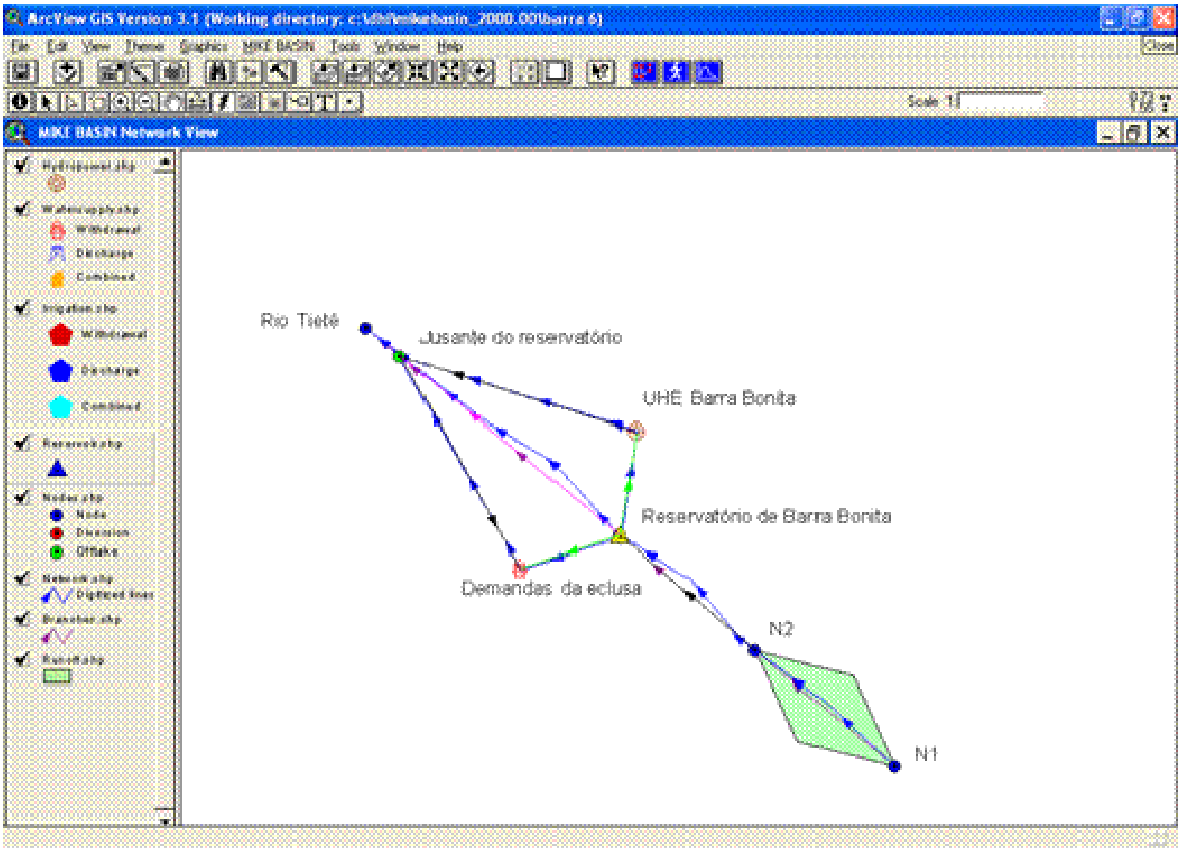


Figura 13 – Rede de fluxo do sistema de recursos hídricos do reservatório de Barra Bonita .

- *N1 – Nó simples:* utilizado para caracterizar o início do sistema, o ponto mais a montante, representa a nascente da bacia.

- *N2 – Nó a montante do reservatório de Barra Bonita*: representa o ponto das vazões afluentes ao reservatório de Barra Bonita. Neste nó são consideradas as vazões obtidas junto ao ONS (Anexo 1).

- *Reservatório de Barra Bonita:* nó do tipo reservatório padrão, considerado como um único armazenamento físico, onde todos os usuários captam água do mesmo volume disponível, respeitando uma política operacional. O nível de água para o início da simulação é adotado

em função do cenário a ser simulado. A topologia do trecho é fornecida através da especificação do nó de montante e dos usuários, bem como a ordem de prioridade dos mesmos.

As metas de armazenamento do reservatório, para estação seca e chuvosa, para cada mês do ano, estão apresentadas nas Tabelas 17 e 18 respectivamente.

Tabela 17 – Armazenamentos meta do reservatório (estação seca).

Meses	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
Volume armazenado médio (%)	95,50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Volume útil (%)	76,05	76,05	76,05	76,05	76,05	76,05
Volume meta (%)	0,73	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76

Fonte: Oliveira (2004).

Tabela 18 – Armazenamentos meta do reservatório (estação chuvosa).

Meses	Jan	Fev	Mar	Out	Nov	Dez
Volume armazenado médio (%)	79,63	85,13	90,85	100,00	100,00	76,10
Volume útil (%)	76,05	76,05	76,05	76,05	76,05	76,05
Volume meta (%)	0,61	0,65	0,69	0,76	0,76	0,58

Fonte: Oliveira (2004).

Para liberação dos volumes, considerou-se os seguintes fatores:

- Cota máxima do reservatório:453,0m;
- Cota operacional mínima: 439,5m;
- Cota para o controle de cheias:451,5m;
- Cota máxima do volume morto: 439,5m;
- Cota mínima do volume morto:422,0m;
- Vazões liberadas a jusante: estabelecidas pela AES Tietê.

Os dados de entrada das curvas cota x área e cota x volume (Tabelas 19 e 20) do reservatório foram levantados e disponibilizados pelo Núcleo de Hidrometria do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Tabela 19 - Área observada para cada cota do reservatório de Barra Bonita-SP.

Cota (m)	Área (m^2)	Cota (m)	Área (m^2)
453	350.634.605,0	437	78.204.386,0
452	305.043.186,0	436	62.578.717,0
451	290.218.523,0	435	45.660.256,0
450	276.374.548,0	434	32.865.041,0
449	263.792.810,0	433	25.395.064,0
448	247.269.502,0	432	13.835.962,0
447	230.315.131,0	431	8.935.212,0
446	215.044.890,0	430	6.963.740,0
445	202.061.191,0	429	5.952.721,0
444	187.499.426,0	428	4.685.685,0
443	171.493.026,0	427	3.650.322,0
442	155.379.388,0	426	2.600.243,0
441	138.712.691,0	425	1.902.814,0
440	123.155.250,0	424	1.153.925,0
439	108.935.823,0	423	492.608,0
438	94.034.535,0	422	140.410,0

Tabela 20 - Volume calculado para cada cota do reservatório de Barra Bonita-SP.

Cota (m)	Volume (m^3)	Cota (m)	Volume (m^3)
453	327.838.895,50	437	70.391.551,50
452	297.630.854,50	436	54.119.486,50
451	283.296.535,50	435	39.262.648,50
450	270.083.679,00	434	29.130.052,50
449	255.531.156,00	433	19.615.513,00
448	238.792.316,50	432	11.385.587,00
447	222.680.010,50	431	7.949.476,00
446	208.553.040,50	430	6.458.230,50
445	194.780.308,50	429	5.319.203,00
444	179.496.226,00	428	4.168.003,50
443	163.436.207,00	427	3.125.282,50
442	147.046.039,50	426	2.251.528,50
441	130.933.970,50	425	1.528.369,50
440	116.045.536,50	424	823.266,50
439	101.485.179,00	423	316.509,00
438	86.119.460,50	422	70.205,00

- *Usina Hidrelétrica de Barra Bonita:* a representação da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita é feita através de um nó específico que desvia água do reservatório e lança para jusante. A série temporal das demandas da UHE (Tabela 21) contém valores mensais variáveis. Existe uma dificuldade de definição dessas demandas, pois estas são definidas pelo ONS de acordo com as necessidades de fornecimento de energia elétrica pelo Sistema Integrado Nacional (SIN). Desta forma, definiu-se as demandas da UHE como as vazões médias dos anos de 2001 a 2004.

Tabela 21 – Demandas mensais da UHE.

Demandas Mensais da UHE Barra Bonita (m^3/s)											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
531,8	780,0	703,2	407,0	249,0	248,0	185,0	190,0	319,0	743,0	332,0	332,0

Fonte: Oliveira (2004)

- *Demandas da Eclusa:* representada pelo nó de captação, é usado para contabilizar o fornecimento de água para a mesma. O dado de entrada consiste em uma série temporal de demandas de água a serem retiradas do sistema.

Na Tabela 22, encontram-se as demandas da eclusa, da vazão ecológica e do rio Tietê. Sendo estipulada uma vazão bem alta para o nó do rio Tietê, tornando possível o processamento do modelo.

Tabela 22 – Demandas da eclusa, da vazão ecológica e do rio Tietê.

Demanda	Valor (m^3/s)
Eclusa	3,64
Vazão ecológica	160
Rio Tietê	5.000

- *Demanda de jusante:* é caracterizada pelo nó de jusante que requer uma demanda mínima de água para que não prejudique a vazão ecológica do rio (Tabela 22) conforme as restrições operacionais apontadas pelo ONS.

- *Dados de saída do modelo*

Os resultados do MIKE BASIN foram gerados em forma de planilhas que apresentam os valores de entrada, os valores meta e os resultados atingidos. A partir das diferenças entre metas de armazenagem do reservatório e valores obtidos, determinou-se os índices de desempenho do sistema designados como: confiabilidade, vulnerabilidade e resiliência.

3.3.1. Índices de desempenho do sistema

O desempenho de qualquer sistema de recursos hídricos pode ser expresso em termos de carga (demanda) e resistência (capacidade). Por exemplo, no caso de abastecimento de água, a demanda e a oferta correspondem respectivamente, à carga e resistência, enquanto que no caso da qualidade da água, o efluente poluidor corresponde à carga do sistema e o padrão de qualidade da água corresponde à resistência.

Medidas como confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade têm sido propostas para avaliar o risco do desempenho de sistemas de recursos hídricos (TICKLE e GOULTER, 1994; MAIER et al., 2001).

Hashimoto et al. (1982) foram os primeiros a introduzir estes índices de desempenho nesta área, embora conceitos similares de freqüência, magnitude e duração das falhas já haviam sido usados previamente para avaliar sistemas de abastecimento de água.

Um sistema de recursos hídricos inclui “I” usuários e vários cenários possíveis. O desempenho do sistema para qualquer usuário “i” pode ser determinado a partir das variáveis

do sistema denotadas por X_t, que podem ser fluxo, vazão, velocidade, armazenamento, e nível de água. As séries temporais das variáveis de desempenho podem ser obtidas através de simulações usando um modelo hidrológico apropriado.

Para cada usuário, é preciso ter um nível limite especificado para a variável do sistema X_0, de forma que se possam separar valores satisfatórios (S) e não satisfatórios, ou falhas (F). Isto pode ser definido como:

$$S = \{X_t | X_t \geq X_0\} \tag{43}$$

$$F = \{X_t | X_t < X_0\} \tag{44}$$

Confiabilidade: é a medida da freqüência que o sistema está no estado satisfatório ou pode também ser definida como a probabilidade de não ocorrer uma falha no sistema.

$$\alpha = \Pr\{X_t \in S\} = \Pr\{X_t \geq X_0\} \tag{45}$$

Resiliência: basicamente descreve quão rapidamente o sistema irá se recuperar quando uma falha ocorrer. Hashimoto et al. (1982) propuseram uma definição de probabilidade condicional.

$$R = \Pr\{X_{t+1} \in S | X_t \in F\} = \Pr\{X_{t+1} \geq X_0 | X_t < X_0\} \tag{46}$$

Vulnerabilidade: é a medida da magnitude da falha do sistema.

A Figura 14 representa a definição de duração (d_j) e déficit (s_j) da variável de estado no período de falha.

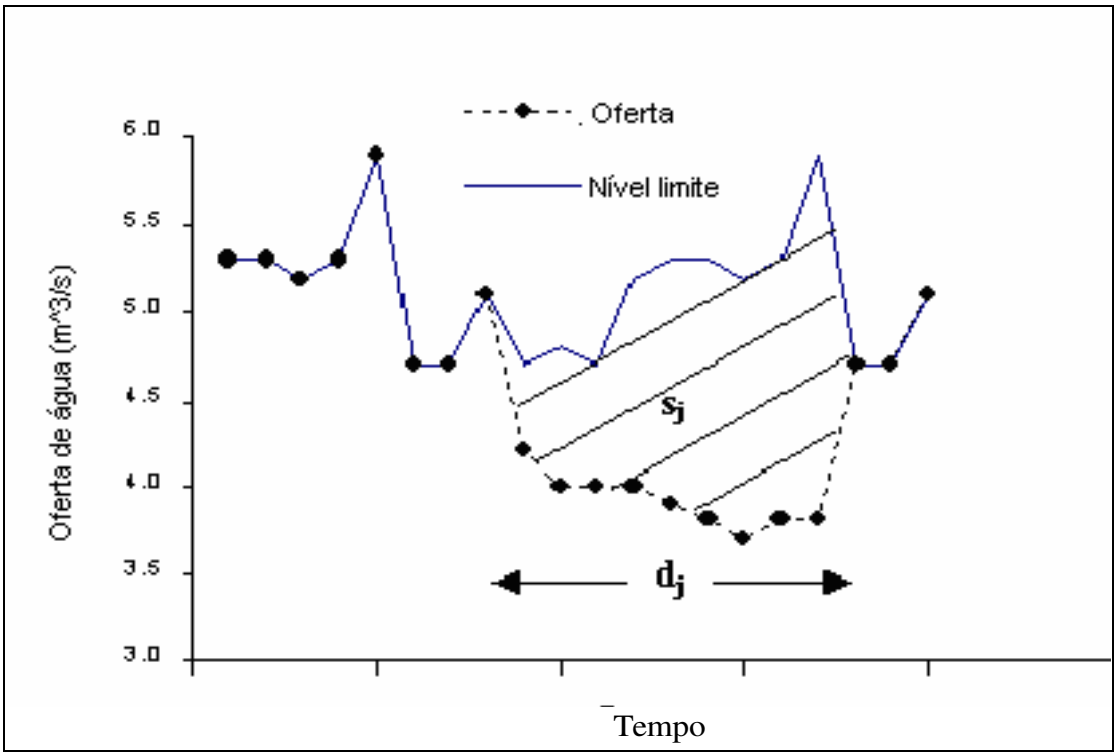


Figura 14 - Definição de duração e déficit de volume no período de falha do sistema.
Fonte: Adaptado de Kjeldsen e Robsjerg (2001).

A vulnerabilidade é então definida pela eq. 47, onde M é o número de eventos no estado de falha.

$$Vul = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} s_j \tag{47}$$

Tais índices são de grande importância para o planejamento e gerenciamento de sistemas hídricos, uma vez que permitem determinar a relação entre totais retirados do sistema e as respectivas garantias. Essas garantias são fundamentais para auxiliar no processo decisório, de forma que os órgãos gestores possam tomar as decisões sobre a quantidade de água que deve ser outorgada em uma determinada bacia hidrográfica ou reservatório nos diferentes períodos hidrológicos.

3.4. Modelo de otimização para operação de reservatórios

Após o levantamento e análise dos dados e realizadas as simulações, desenvolveu-se o modelo de otimização baseado no método das restrições.

Segundo Lopes et.al. (2002), o Operador Nacional do Sistema (ONS) realiza a modelagem de sistemas de recursos hídricos para geração de energia considerando como função-objetivo a geração e os demais usos da água como restrições a serem atendidas.

Os modelos de otimização procuram a solução do problema de forma a atender aos objetivos estabelecidos para a operação do sistema. Isso se dá a partir da definição de uma função-objetivo, que é uma representação matemática dos objetivos a serem obtidos pela operação do sistema em análise. Dessa forma, os modelos de otimização buscam a maximização ou minimização da função-objetivo, cujas variáveis básicas são as chamadas variáveis de decisão. Uma vez resolvido o problema, o conjunto das variáveis de decisão obtido é a solução ótima para a operação do sistema. Todos os processos físicos e condições de contorno do problema formam o conjunto das equações de restrição, como por exemplo, os limites para a capacidade do reservatório, os limites para as vazões defluentes, o respeito ao balanço de massa, etc.

As regras de operação de reservatórios indicam os volumes de armazenamento e liberações requeridas em qualquer período de tempo do ano. Algumas regras identificam metas de volume de armazenamento (*rule curves*) e outras identificam zonas de armazenamento, cada uma associada a uma política de liberação particular.

Otimizar a regra operacional de um reservatório significa determinar a descarga operada ótima, para um certo intervalo de tempo, que maximiza ou minimiza uma ou mais funções-objetivo e que atenda a diversas restrições pré-estabelecidas.

As restrições consideradas no modelo, referem-se às liberações durante o período de tempo t no reservatório, à capacidade de armazenamento e às demandas dos outros usos da água.

Com base nos equacionamentos dos problemas de otimização da operação de reservatórios tratados no item 2.2, formulou-se o modelo para otimização da regra operacional do reservatório de Barra Bonita através de programação não-linear baseado no método das restrições. O modelo foi elaborado com base na linguagem estruturada para solução de problemas de programação matemática GAMS (BROOKE et. al., 1998). Esse tipo de linguagem facilita a formulação de problemas de otimização baseados em programação matemática para serem resolvidos por determinados pacotes de otimização, como o MINOS.

3.4.1. Características do software GAMS

Nas últimas décadas, houve um grande avanço no desenvolvimento de programas e pacotes computacionais voltados para a solução de problemas de otimização, como o MINOS, o LINDO, o CPLEX, etc. Esses pacotes foram criados com base no desenvolvimento de diversos algoritmos e técnicas para a solução de problemas de programação linear e não-linear. Com o advento das linguagens de modelação, como o GAMS (BROOKE et al.,1998), os processos de formulação dos problemas e de processamento desses pacotes computacionais tornaram-se extremamente facilitados.

Há alguns anos atrás, foram criadas as linguagens voltadas para a programação matemática e a formulação de problemas de otimização. Essa é uma forma muito prática e direta de se criar interfaces entre o usuário e o pacote de otimização, na medida em que permite definir o modelo e a entrada de dados de uma maneira muito intuitiva e seguindo basicamente a notação matemática utilizada na descrição desses problemas.

O GAMS foi especificamente idealizado para modelagem de problemas de programação linear e não-linear. A ferramenta é útil na solução de problemas complexos e de grande porte e funciona muito bem quando utilizada em microcomputadores. Segundo Brandão (2004), a linguagem foi desenvolvida com o propósito de atender aos seguintes requisitos: produzir uma linguagem de alto nível voltada para a representação compacta e adequada de modelos complexos e de grande porte; permitir que as mudanças no modelo sejam feitas de forma simples e permitir que o processo de elaboração de modelos possa ser independente dos pacotes de otimização a serem utilizados.

O desenvolvimento do GAMS incorporou as idéias derivadas da teoria de banco de dados relacionais e da programação matemática, com o objetivo de mesclar essas idéias de forma a atender às necessidades estratégicas dos modeladores. A teoria sobre banco de dados forneceu o arcabouço necessário para desenvolvimento das estruturas de organização, armazenamento e transformação dos dados em geral. A programação matemática deu o suporte necessário aos processos de formulação e descrição do problema e contribuiu com uma variedade de métodos para sua solução. A separação entre lógica e dados permite que o problema possa aumentar de tamanho sem aumentar a complexidade de sua representação e o uso da modelagem relacional de dados faz com que os recursos computacionais sejam alocados de forma automática. Isto resulta que o usuário não precisa se preocupar com detalhes sobre armazenamento de dados, como tamanho de matrizes e vetores (BRANDÃO, 2004).

Por essas razões, o GAMS facilita e agiliza a elaboração e manipulação de modelos de otimização, os modelos podem ser escritos e alterados facilmente. Os dados podem ser armazenados em arquivos texto e/ou em estruturas de bancos de dados ou planilhas eletrônicas.

O modelo formulado neste estudo utiliza o pacote computacional MINOS para resolver o problema de otimização proposto. O software MINOS foi desenvolvido pelo Laboratório de Otimização de Sistemas da Universidade de Stanford na Califórnia e permite a solução de problemas de programação linear e não-linear segundo a seguinte formulação básica:

Minimizar $_{\mathbf{x,y}}$: $F(x) + c^t x + d^t y$ (48)

sujeito a:

$$f(x) + A_{1y} = b_1 \quad (49)$$

$$A_{2x} + A_{3y} = b_2 \quad (50)$$

$$l \leq \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \leq u \quad (51)$$

onde os vetores *c, d,* b_1, b_2, *l, u* e as matrizes A_1, A_2, *e* A_3 são constantes, *F(x)* é uma função escalar contínua e *f(x)* é um vetor de funções contínuas. Os n_1 componentes de *x* são as variáveis não-lineares e os n_2 componentes de *y* são as variáveis lineares. Analogamente, as m_1 equação (49) são as chamadas restrições não-lineares e as m_2 equação (50) são as restrições lineares. As equações (49) e (50) representam a totalidade das restrições do problema. As restrições representadas pela eq. (51) indicam os limites superiores e inferiores de todas as variáveis.

Nos casos em que as funções *F(x)* e *f(x)* não existam, o problema se resume a uma aplicação de Programação Linear (PL). Nesse caso, o MINOS utiliza o método Simplex para solução do problema. Quando os aspectos não-lineares estão confinados à função *F(x)* da

função-objetivo, tem-se um problema de Programação Não-Linear (PNL) com restrições lineares.

O MINOS consegue resolver uma grande variedade de problemas de otimização linear e não-linear, pois os aspectos não-lineares podem aparecer, tanto nas restrições, como na função-objetivo. Devido a sua flexibilidade, o MINOS tornou-se uma importante ferramenta na procura de soluções de problemas de operação de reservatório.

O estudo de caso enfocou os usos da água do reservatório para geração de energia hidroelétrica e a navegação (níveis de armazenamento do reservatório), pois são os principais usos.

Quanto à geração de energia, realizou-se análises da produção energética resultante da modelagem. Foi considerada como variável de análise, a média de cinco anos da energia total gerada pela usina e mensal correspondente a cada seqüência temporal otimizada. O problema de otimização também levou em conta as demais restrições operacionais do reservatório e da UHE, conforme o item 3.1.4.

De acordo com o exposto em 3.2, o intervalo de tempo de cálculo adotado é mensal e o horizonte do período de análise é igual a 5 anos (60 meses). O modelo foi desenvolvido segundo o método das restrições onde, na função-objetivo, buscou-se maximizar a energia média gerada pelo sistema ao longo do período de análise. A Figura 15 apresenta a tela de programação do software GAMS.

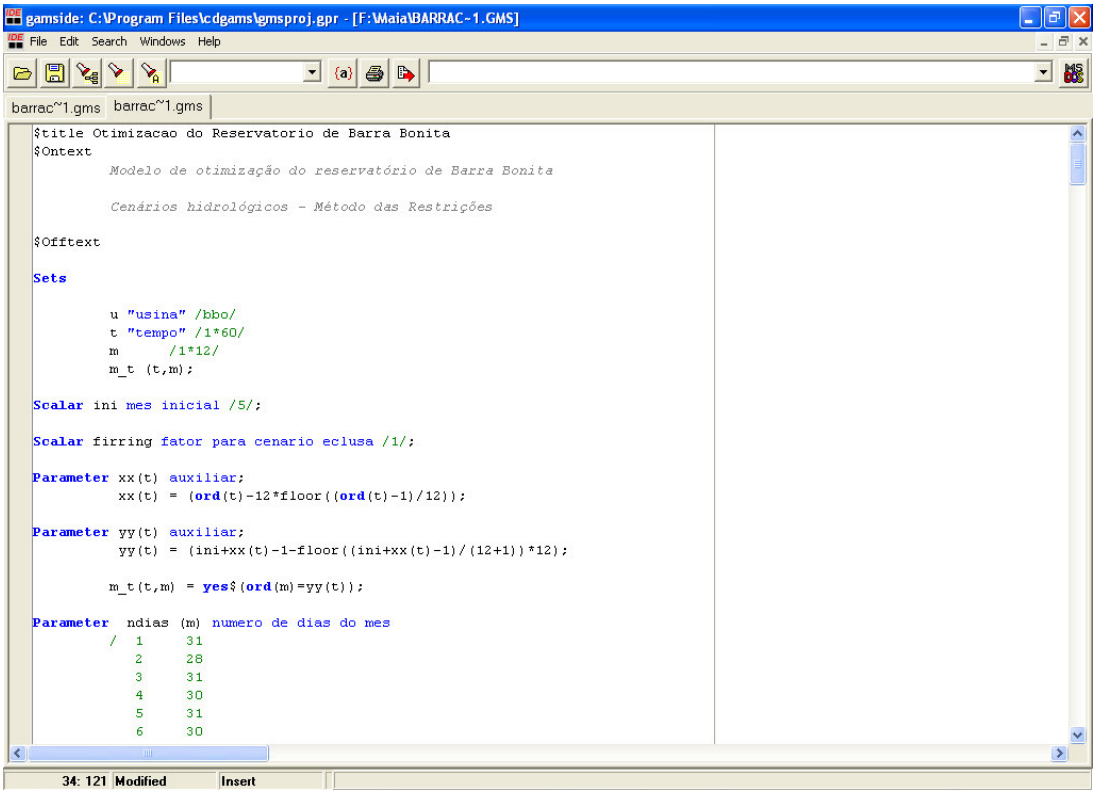


Figura 15 – Tela de programação do software GAMS.

O equacionamento deste método é apresentado na seqüência e a notação matemática adotada é similar à empregada no modelo desenvolvido com a linguagem GAMS.

Função-objetivo:

Maximizar em (maximizar a energia média da usina)

$$Max \ldots \sum_{i=1}^{m} \frac{\sum_{t=1}^{n} PRT_{i,t} \cdot QT_{i,t}}{n} \tag{52}$$

Equações auxiliares:

$$qmon(t,u) = afl(t,u) - afl(t-1) \tag{53}$$

$$qdfl(t,u) = qtur(t,u) + qver(t,u) \tag{54}$$

$$named\ (t,u) = \begin{bmatrix} a0(u) + a1(u) \cdot vfim(t,u) + a2(u) \cdot vfim(t,u)^2 \\ + a3(u) \cdot vfim(t,u)^3 + a4(u) \cdot vfim(t,u)^4 + a0(u) \\ + a1(u) \cdot vfim(t-1,u) + a2(u) \cdot (t-1,u)^2 \\ + a3(u) \cdot vfim(t-1,u)^3 + a4(u) \cdot vfim(t-1,u)^4 \end{bmatrix} / 2 \tag{55}$$

$$amed\ (t,u) = [s0(u) + s1(u) \cdot vfim(t,u) + s0(u) + s1(u) \cdot vfim(t-1,u)] / 2 \tag{56}$$

$$naj(t,u) = \begin{bmatrix} b0(u) + b1(u) \cdot qdfl(t,u) + b2(u) \cdot qdfl(t,u)^2 \\ + b3(u) \cdot qdfl(t,u)^3 + b4(u) \cdot qdfl(t,u)^4 \end{bmatrix} \tag{57}$$

$$h(t,u) = named\ (t,u) - naj(t,u) \tag{58}$$

$$ener(t,u) = qtur(t,u) \cdot h(t,u) \cdot k(u) \tag{59}$$

$$em = \left[\sum_{t=0}^{60} ener(t,u) \right] / 60 \tag{60}$$

Restrições:

$$vfim(t,u) = vfim(t-1,u) + \{[qmon(t,u) - qtur(t,u) - qver(t,u) - quso(t,u)]\} \cdot dt(t) / 1000000 - amed\ (t,u) \tag{61}$$

$$ener(t,u) \leq pi(u) \cdot fr(u) \tag{62}$$

$$ener(t,u) \leq \{h(t,u) \cdot [c0(u) + c1(u) \cdot h(t,u)] \cdot k(u)\} \cdot fr(u) \tag{63}$$

$$vfim(t,u) \leq v \max esp(t,u) \tag{64}$$

$$vfim(t,u) \geq v \min(u) \tag{65}$$

$$qdfl(t,u) \geq q \min(u) \tag{66}$$

Condições de contorno:

$$\text{se } t = 0 \rightarrow vfim(t,u) = v0(u); quso(t,u) = 0 \tag{67}$$

$$\text{se } t = 60 \rightarrow vfim(t,u) = v0(u) \tag{68}$$

onde

u = índice de usina: bbo (Barra Bonita);

t = índice de tempo em meses: 1,2,.....,60;

em = energia média do sistema ao longo do período de análise;

$PRT_{i,t}$ = produtibilidade da usina *i*, no mês *t* em MW/m^3/s.

$QT_{i,t}$ = vazão turbinada pela usina correspondente ao reservatório *i*, no intervalo *t*;

*afl(t,u)** = vazão natural afluente ao reservatório *u* no intervalo de tempo *t*;

qtur(t,u) = vazão turbinada pela usina *u* no intervalo de tempo *t*;

qver(t,u) = vazão vertida pela usina *u* no intervalo de tempo *t*;

qdfl(t,u) = vazão defluente total da usina *u* no intervalo de tempo *t*;

*quso(t,u)** = vazão para eclusa extraída do reservatório da usina *u* no intervalo de tempo *t*;

vfim(t,u) = volume do reservatório da usina *u* no final do intervalo de tempo *t*;

named(t,u) = nível d'água médio do reservatório da usina *u* ao longo do intervalo de tempo *t*;

amed(t,u) = área média do reservatório da usina *u* ao longo do intervalo de tempo *t*;

naj(t,u) = nível d'água no canal de fuga da usina *u* ao longo do intervalo de tempo *t*;

a0(u).....a4(u)** = parâmetros da curva cota-volume da usina *u*;

s0(u), s1(u)** = parâmetros da curva área-volume da usina *u*; *b0(u)*.....b4(u)** = parâmetros da curva-chave do canal de fuga da usina *u*;

h(t,u) = queda bruta da usina *u* no intervalo de tempo *t*;

k(u) = 9,81.10-3.*ηg*. *ηt*.*ηh*: produtibilidade específica da usina *u*;

ener(t,u) = energia gerada pela usina *u* no intervalo de tempo *t*;

*dt(t)** = número de segundos do intervalo de tempo *t*;

*pi(u)** = potência instalada da usina *u*;

*fr(u)** = fator de reserva ou índice de disponibilidade de máquinas da usina *u*;

c0(u), c1(u)** = parâmetros da equação da vazão turbinada máxima em função da queda da usina *u*;

*vmaxesp(t,u)** = volume máximo do reservatório da usina u no final do intervalo de tempo *t*;

*vmin(u)** = volume mínimo do reservatório da usina *u*;

*v0(u)** = volume inicial do reservatório da usina *u*.

Observação: As grandezas assinaladas com (*) são dados de entrada do modelo e encontram-se no item 3.1.4.

3.5. Amostragem dos parâmetros de qualidade da água do reservatório

Para amostragem dos parâmetros de qualidade da água, foram aferidos 30 pontos (Tabela 23) adotados por Prado (2004) e divididos por compartimentos do reservatório de Barra Bonita (“braço” do rio Piracicaba, “braço” do rio Tietê, “corpo” central do reservatório, encontro dos “braços” e barragem) para que pudesse ser realizada uma análise espacial do mesmo (Figura 16).

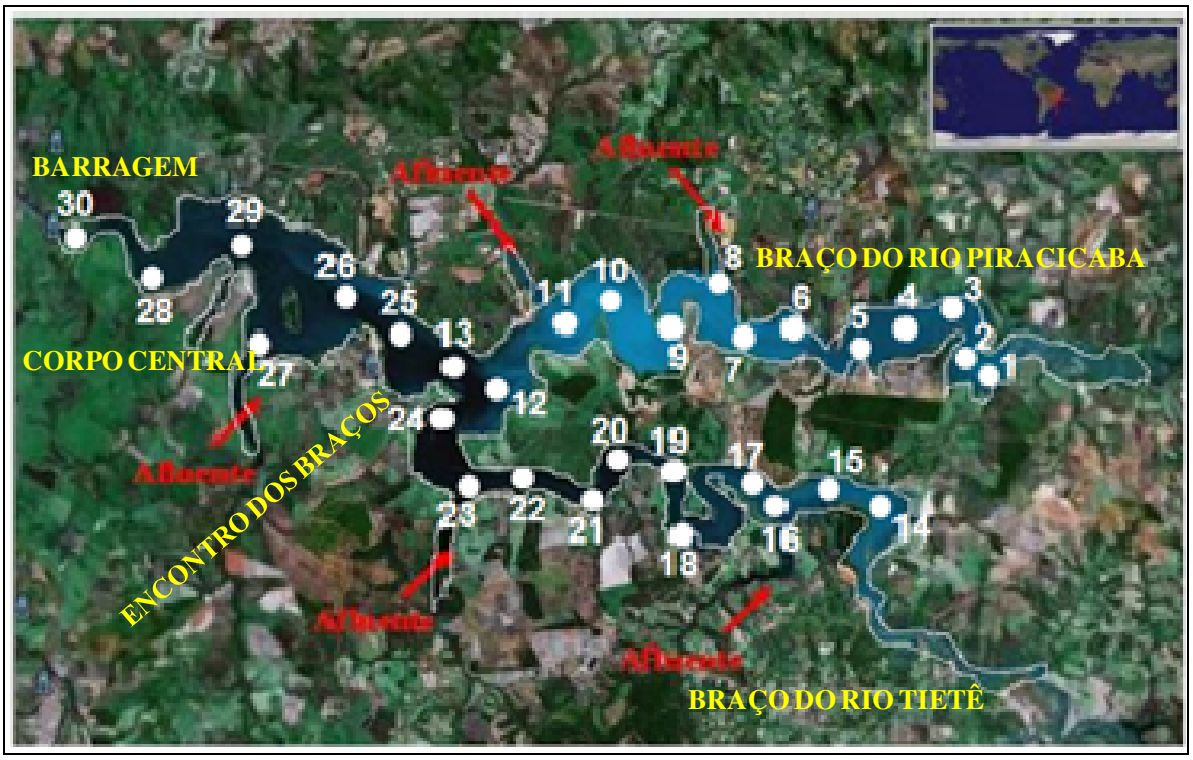


Figura 16 - Localização dos pontos de amostragens de água (Google Earth - 2006).
Fonte: http://earth.google.com/intl/pt/

Tabela 23 - Coordenadas geográficas dos pontos de amostragem de água.

Ponto	Latitude	Longitude	Ponto	latitude	Longitude
1	s 22 39 27,99	o 48 05 21,66	16	s 22 42 02,45	o 48 12 06,18
2	s 22 38 31,28	o 48 05 53,51	17	s 22 41 44,85	o 48 12 18,64
3	s 22 37 06,77	o 48 05 47,37	18	s 22 42 15,82	o 48 14 48,91
4	s 22 37 43,12	o 48 07 18,01	19	s 22 40 21,66	o 48 15 03,45
5	s 22 37 46,45	o 48 08 46,88	20	s 22 40 03,79	o 48 16 30,23
6	s 22 37 05,91	o 48 10 52,49	21	s 22 41 01,28	o 48 17 26,70
7	s 22 37 10,51	o 48 12 24,41	22	s 22 40 10,70	o 48 19 26,41
8	s 22 35 29,21	o 48 12 46,16	23	s 22 40 02,75	o 48 20 57,14
9	s 22 36 41,91	o 48 14 17,02	24	s 22 38 12,52	o 48 21 28,99
10	s 22 35 38,26	o 48 15 50,48	25	s 22 36 25,08	o 48 21 25,02
11	s 22 35 59,17	o 48 17 14,07	26	s 22 35 43,69	o 48 22 14,68
12	s 22 37 27,65	o 48 19 50,05	27	s 22 35 22,07	o 48 26 22,26
13	s 22 36 55,76	o 48 20 43,01	28	s 22 33 21,42	o 48 29 14,52
14	s 22 42 14,76	o 48 08 58,28	29	s 22 32 48,74	o 48 26 38,36
15	s 22 41 48,06	o 48 10 23,87	30	s 22 31 52,78	o 48 31 14,98

Obteve-se *in loco,* os parâmetros pH, temperatura, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, profundidade e turbidez, utilizando uma Sonda Multiparâmetros de Monitoramento de Qualidade da Água YSI 6820 (Figura 17) e um aparelho de GPS (Global Positioning System) para o posicionamento da embarcação. Obteve-se os parâmetros no começo do mês de julho de 2006 (estação seca) e no final do mês de novembro de 2006 (estação chuvosa). Os dados obtidos foram comparados com os padrões de classe II da Resolução Nº 357 do CONAMA de 17/03/2005, para verificação do enquadramento do reservatório na referida classe.

Posteriormente, os dados foram introduzidos no software Surfer para realização da análise espaço-temporal dos diversos compartimentos do reservatório com intuito de averiguar a dinâmica espacial das variáveis coletadas em relação à sazonalidade (período seco e chuvoso). Foram testados os métodos de interpolação citados no item 2.4, a saber: inverso do quadrado da distância; regressão polinomial; mínima curvatura; e a krigagem. Após os testes, o método selecionado foi o de interpolação do inverso do quadrado da distância. Adotou-se este método devido à apresentação de melhores resultados em relação à fidelidade aos dados originais e suavidade das curvas, ao demonstrar aspectos espaço-temporais das informações obtidas.

Os mapas de superfície de tendência (Figura 18), gerados a partir do método selecionado, possuem graduações de cores que indicam em quais compartimentos do reservatório, foram obtidas as maiores concentrações para as variáveis analisadas. Os pontos de amostragem são representados por seus respectivos valores, sendo que o Surfer gera isolinhas que representam os pontos com valores iguais.

Figura 17 – Sonda Multiparâmetros de Monitoramento de Qualidade da Água YSI 6820.

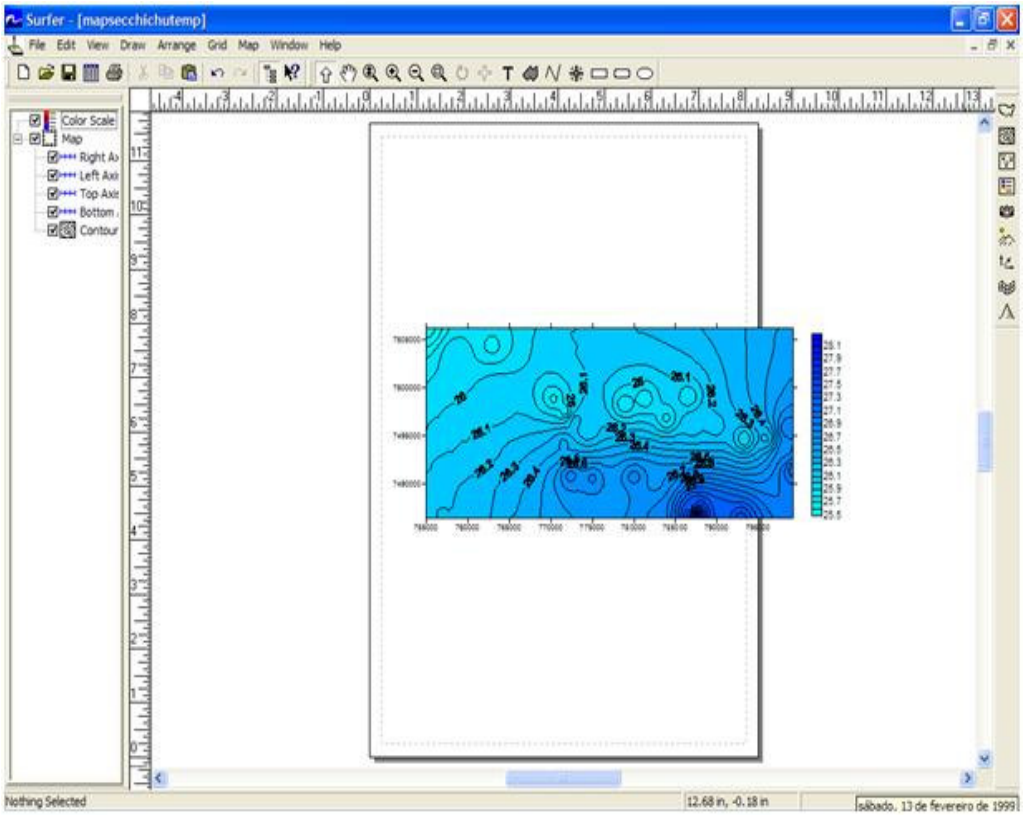


Figura 18 – Tela de saída dos mapas gerados pelo software Surfer.

4. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados do processo de simulação, modelo de otimização e da geração dos mapas, para análise espaço-temporal dos parâmetros de qualidade da água.

4.1. Resultados da simulação computacional dos usos múltiplos do reservatório (Modelo MIKE BASIN)

Os resultados das simulações foram analisados e apresentados sob a forma de gráficos e tabelas, demonstrando o comportamento das variáveis de interesse ao longo do tempo.

Foram simulados três cenários diferentes, para verificar o comportamento do reservatório ao longo do período de análise. Os cenários foram os seguintes:

- Cenário1: a geração de energia e a navegação têm a mesma prioridade;
- Cenário 2: a navegação tem prioridade sobre a geração de energia;
- Cenário 3: a geração de energia tem prioridade sobre a navegação.

Nas Figuras 19, 20 e 21, encontra-se a variação dos volumes armazenados no reservatório para cada um dos cenários simulados.

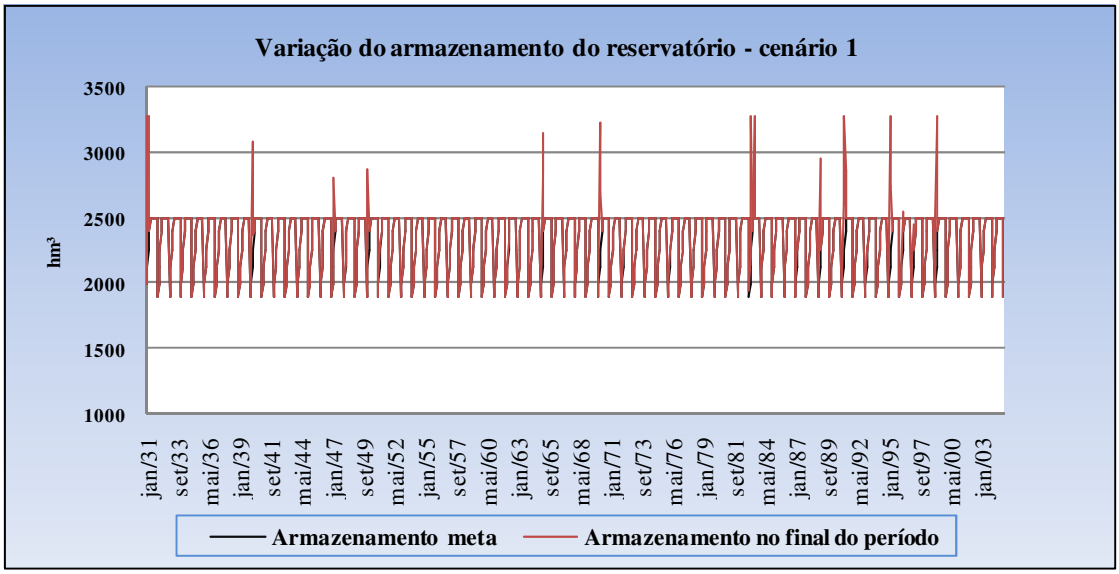


Figura 19 – Variação dos volumes armazenados no reservatório – cenário 1.

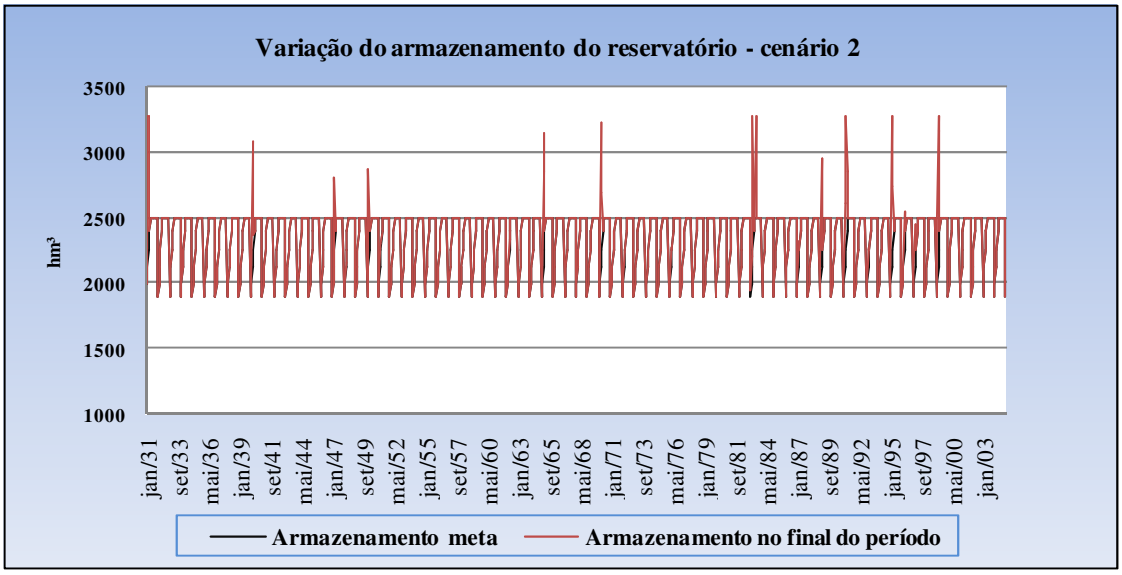


Figura 20 – Variação dos volumes armazenados no reservatório – cenário 2.

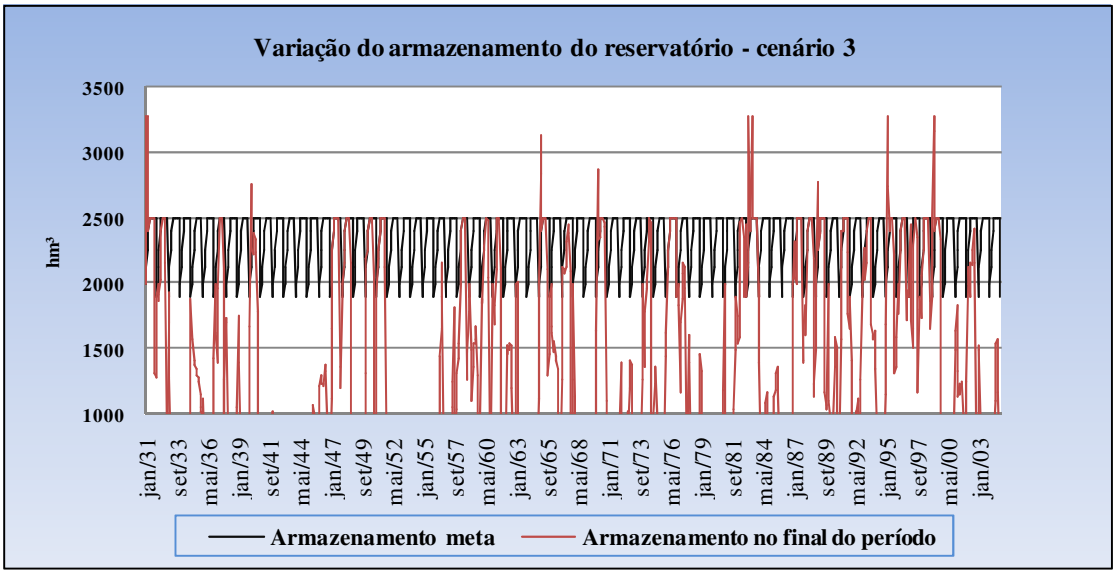


Figura 21 – Variação dos volumes armazenados no reservatório – cenário 3.

Percebe-se que os valores dos volumes nos cenários 1 e 2 se mantiveram por todo período igual ou acima da meta de armazenamento do reservatório. Já no cenário 3, os volumes se mantiveram abaixo do volume meta em grande parte do tempo.

Nas Figuras 22, 23 e 24, encontra-se a variação das vazões fornecidas para o atendimento da demanda da UHE Barra Bonita, para cada um dos cenários simulados.

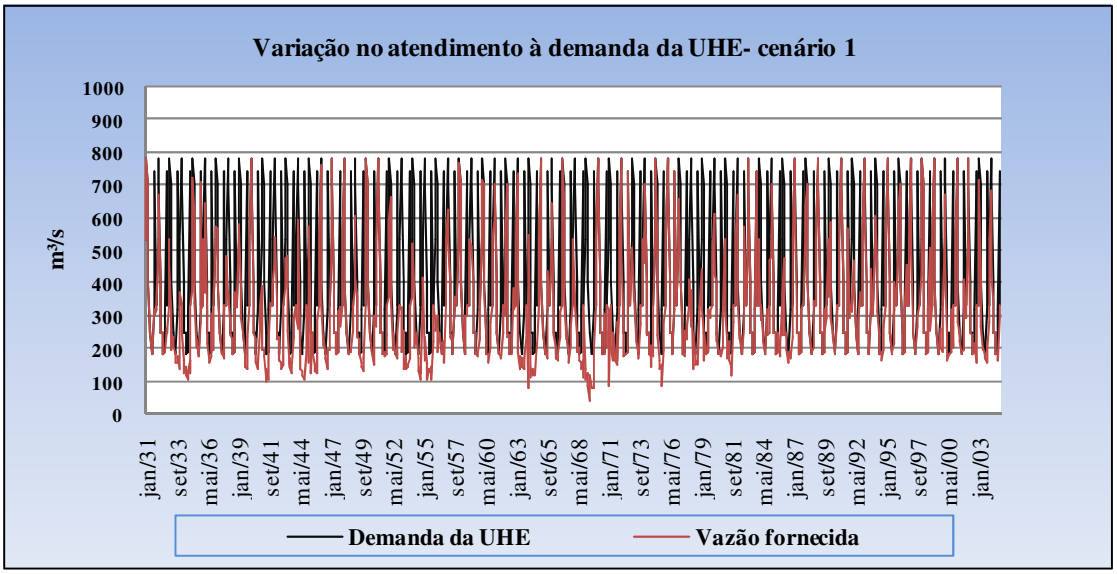


Figura 22 – Variação das vazões fornecidas para UHE – cenário 1.

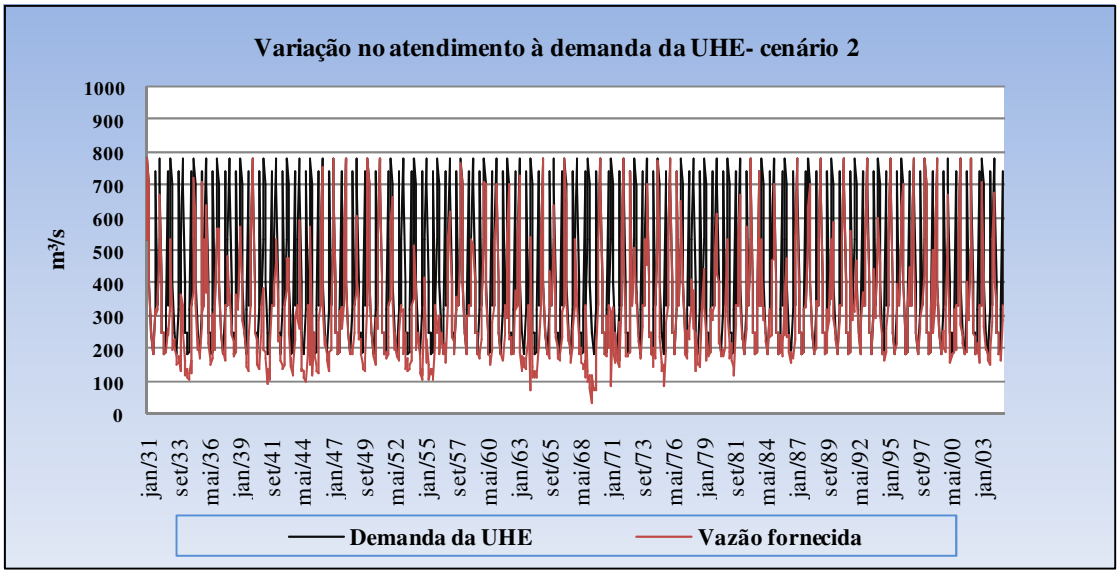


Figura 23 – Variação das vazões fornecidas para UHE – cenário 2.

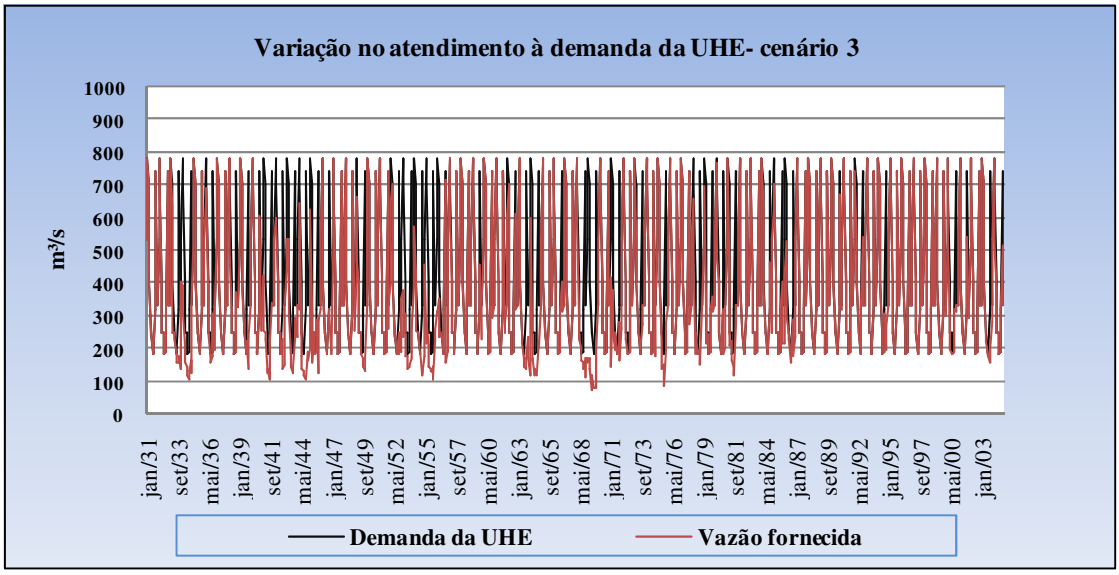


Figura 24 – Variação das vazões fornecidas para UHE – cenário 3.

Observa-se que no cenário 2, onde a navegação tem prioridade sobre a geração de energia, ocorreu um número maior de falhas no atendimento à demanda da UHE, se comparado aos cenários 1 e 3, onde a geração de energia tem prioridade igual e maior respectivamente que a navegação.

Nas Figuras 25, 26 e 27, encontra-se a variação das vazões fornecidas para o atendimento da demanda da eclusa, para cada um dos cenários simulados:

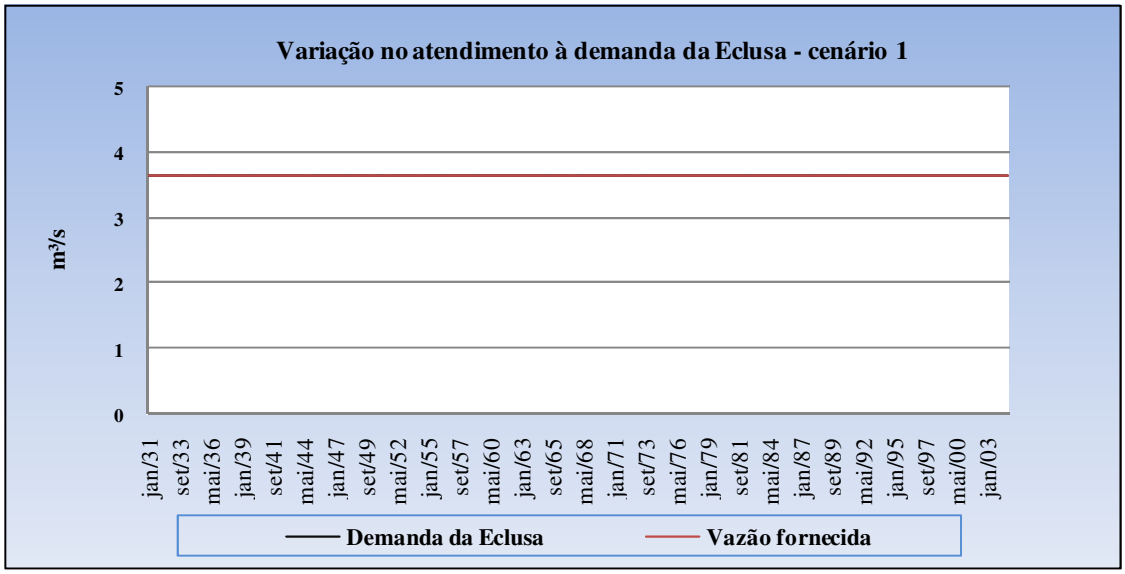


Figura 25 – Variação das vazões fornecidas para a eclusa – cenário 1.

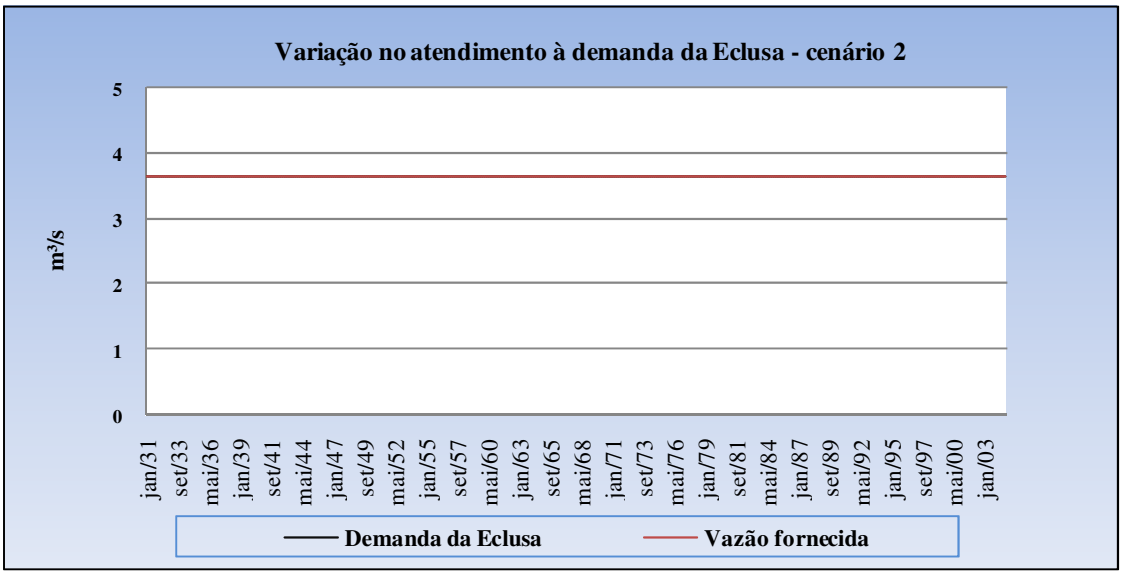


Figura 26 – Variação das vazões fornecidas para a eclusa – cenário 2.

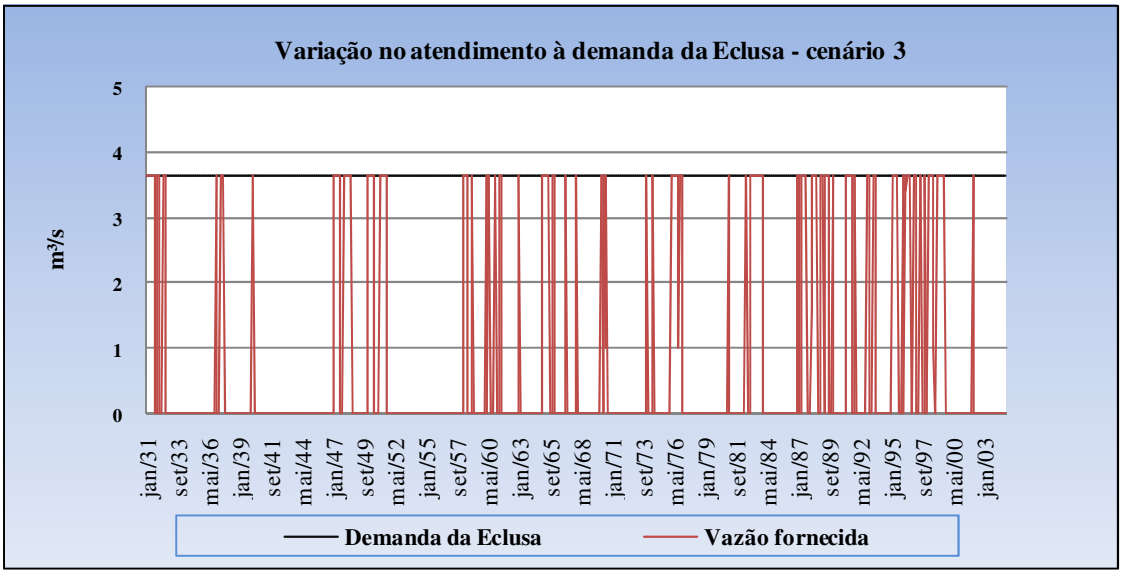


Figura 27 – Variação das vazões fornecidas para a eclusa – cenário 3.

Observa-se que nos cenários 1 e 2, a demanda de vazões para a eclusa foi atendida na totalidade do tempo. Já no cenário 3, onde a prioridade era a geração de energia, ocorreram diversas falhas no atendimento a esta demanda, devido ao aumento da vazão turbinada pela usina.

A variação das vazões liberadas (soma das vazões vertidas e turbinadas) a jusante da UHE, para cada um dos cenários simulados, encontram-se nas Figuras 28, 29 e 30.

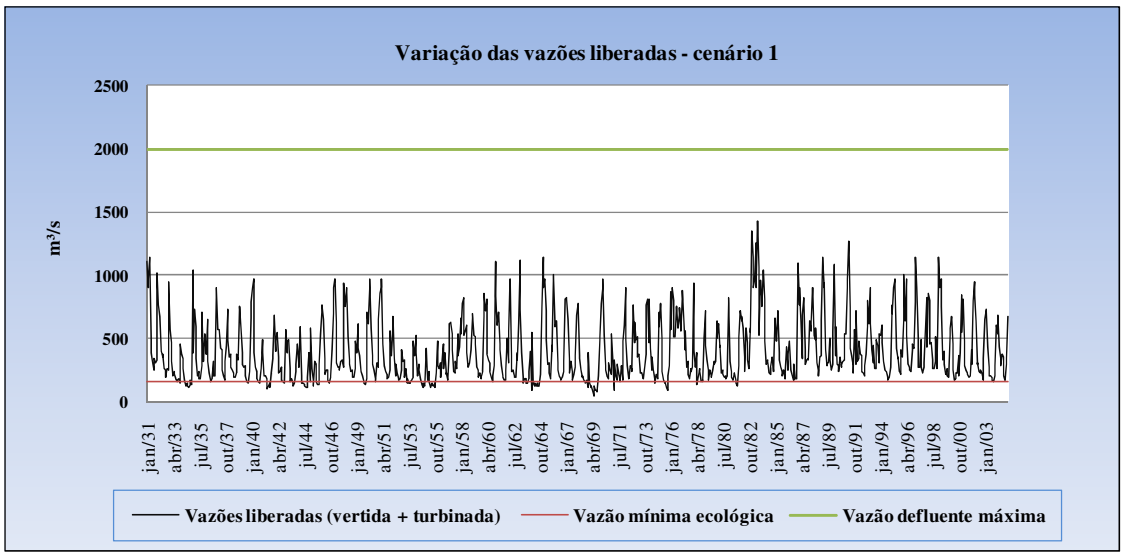


Figura 28 – Variação das vazões liberadas – cenário 1.

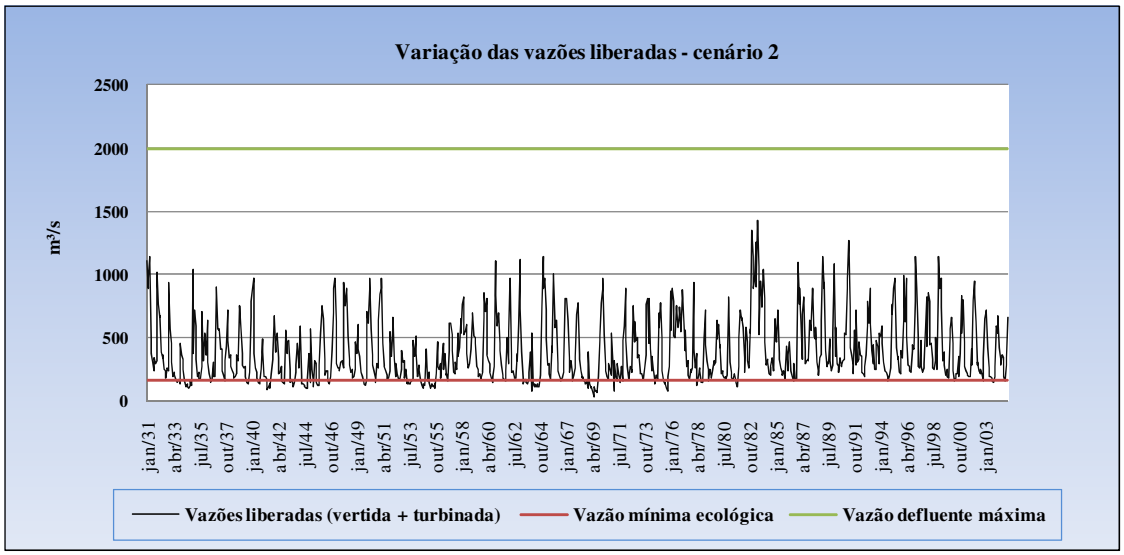


Figura 29 – Variação das vazões liberadas – cenário 2.

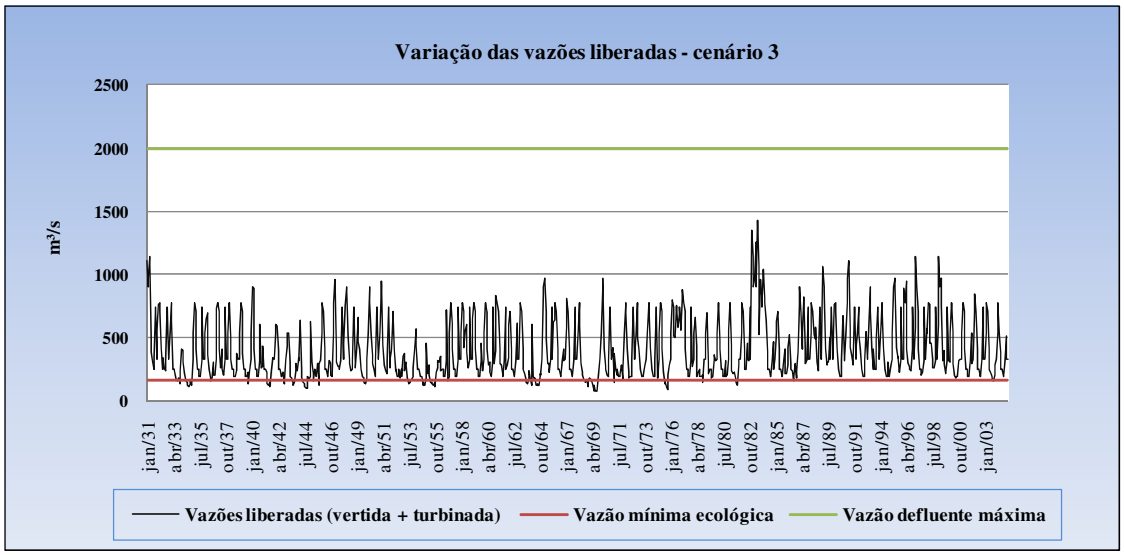


Figura 30 – Variação das vazões liberadas – cenário 3.

Percebe-se que, apesar dos valores de vazões liberadas da UHE se manterem na maior parte do tempo entre os limites mínimo e máximo, em todos os cenários ocorreram valores de vazões abaixo da vazão ecológica.

- Índices de desempenho aplicados aos resultados do modelo MIKE BASIN

Para uma melhor compreensão dos resultados gerados pela simulação computacional, realizou-se uma avaliação dos resultados através de índices de desempenho, conhecidos como confiabilidade, vulnerabilidade e resiliência. As Tabelas 24, 25 e 26 apresentam os resultados para cada cenário, respectivamente.

Tabela 24 – Índices de desempenho (cenário 1).

Índices de desempenho – cenário 1			
	Confiabilidade (%)	Vulnerabilidade (%)	Resiliência (%)
Armazenamento	100,0	0,0	0,0
Demanda (UHE)	46,9	26,1	26,6
Navegação	100,0	0,0	0,0
Demanda (Eclusa)	100,0	0,0	0,0
Garantia da vazão ecológica	90,0	18,1	39,9

Tabela 25 – Índices de desempenho (cenário 2).

Índices de desempenho – cenário 2			
	Confiabilidade (%)	Vulnerabilidade (%)	Resiliência (%)
Armazenamento	100,0	0,0	0,0
Demanda (UHE)	42,9	24,7	25,2
Navegação	100,0	0,0	0,0
Demanda (Eclusa)	100,0	0,0	0,0
Garantia da vazão ecológica	88,9	19,4	43,4

Tabela 26 – Índices de desempenho (cenário 3).

Índices de desempenho – cenário 3			
	Confiabilidade (%)	Vulnerabilidade (%)	Resiliência (%)
Armazenamento	17,9	49,5	6,9
Demanda (UHE)	66,3	24,3	21,5
Navegação	8,3	28,0	5,8
Demanda (Eclusa)	20,6	99,7	7,0
Garantia da vazão ecológica	93,0	19,0	40,3

Observa-se que o cenário 3 obteve resultado insatisfatório, pois apresenta valores extremamente baixos para o armazenamento no reservatório, prejudicando a navegação; o mesmo apresenta valores muito baixos de confiabilidade no atendimento às demandas da eclusa (20,6), e vulnerabilidade muito alta (99,7%). A confiabilidade do atendimento às demandas da UHE é maior do que nos outros três cenários, pois esta tem prioridade sobre os outros usos neste cenário. No entanto, procurou-se buscar o equilíbrio no atendimento de todas as demandas, fato que pode ser observado nos cenários 1 e 2. Percebe-se que os índices de desempenho para os dois cenários são similares. A confiabilidade, vulnerabilidade e resiliência, no atendimento da demanda da UHE no cenário 1, as quais apresentaram valores de 46,9%, 26,1% e 26,6%, são similares às do cenário 2, com valores de 42,9%, 24,7% e 25,2%. Portanto, o cenário 1 foi definido como o melhor entre os três cenários analisados, pelo fato de dar igual prioridade aos dois usos principais da água do reservatório.

4.2. Análise dos usos múltiplos do reservatório através do modelo de otimização

Nesta etapa, analisou-se os problemas formulados no modelo segundo o método das restrições, utilizando a ferramenta GAMS. Utilizou-se seqüências temporais de vazões médias mensais com extensão de cinco anos referentes a cenários hidrológicos pré-definidos (cenários seco, médio e úmido) .

Houve também a necessidade de se definir o mês mais adequado para o início do processo de otimização, de forma a evitar que esse aspecto influenciasse significativamente nos resultados, sendo aconselhável iniciar a modelagem em meses que o reservatório estivesse cheio. Para tanto, buscou-se definir esse mês a partir dos armazenamentos médios dos anos de 2001 a 2006 apresentados no Anexo 2. Os resultados indicaram que as médias mais elevadas referiam-se aos armazenamentos no final do mês de abril. O valor resultante foi de um armazenamento inicial para o reservatório de Barra Bonita de 93,67%. Dessa forma, todo o processo de otimização foi realizado considerando como armazenamento inicial o valor citado acima com início sempre no mês de maio e fim no mês de abril.

Os processamentos para análise do método das restrições foram feitos com base na maximização da energia média gerada em cada seqüência temporal considerada. As vazões derivadas para a eclusa foram tratadas como restrições. No Apêndice A, encontra-se o relatório de saída do modelo de otimização fornecido pelo software GAMS para o cenário hidrológico médio. A seguir, apresenta-se os resultados gerados pelo modelo de otimização.

A Figura 31 apresenta a variação do armazenamento do reservatório no final de cada período, para os três cenários analisados. Observa-se que, durante todo o tempo, o armazenamento não ultrapassou os limites máximo e mínimo, sendo que o limite máximo foi estipulado como o volume útil do reservatório (2566 hm³) e o volume mínimo operacional sendo (1800 hm³), que é o volume mínimo para que se possa manter a navegação no

reservatório. Os menores armazenamentos foram observados em sua maioria nos meses de dezembro, julho e agosto, e os maiores armazenamentos foram observados no mês de maio. Mesmo com a otimização da geração de energia, o cenário seco conseguiu manter os seus volumes dentro do mínimo operacional, não prejudicando a navegação.

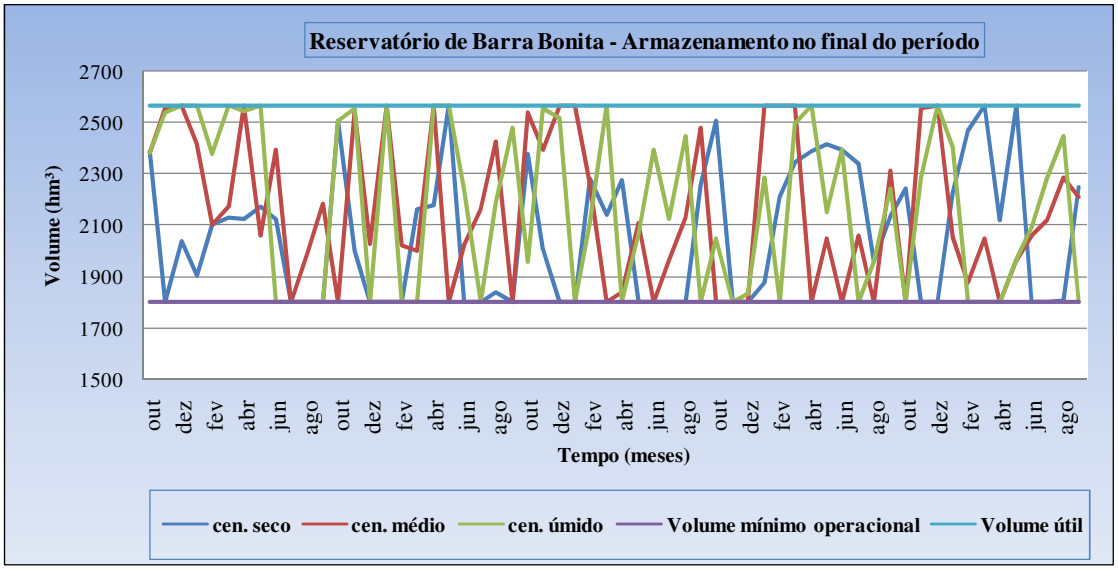


Figura 31 – Variação do armazenamento do reservatório.

Em relação à variação do nível d'água do reservatório, não houveram grandes oscilações estando sempre entre os níveis 451,54 o máximo e 448,86 o mínimo (nível mínimo equivalente ao volume útil e não ao volume total do reservatório), para os três cenários analisados, como apresenta a Figura 32.

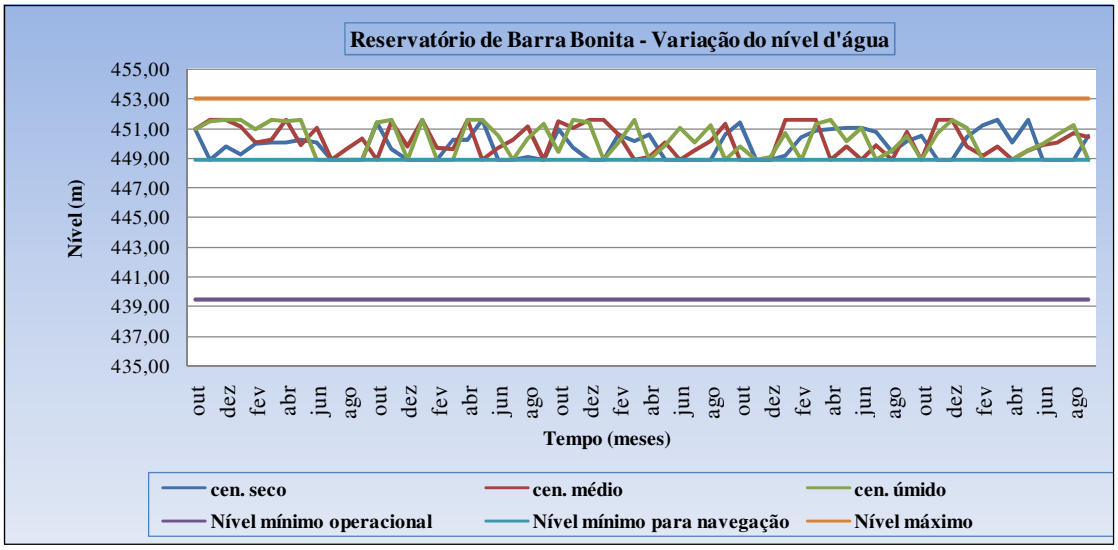


Figura 32 – Variação do nível d'água .

A Figura 33 apresenta a variação das vazões turbinadas para os três cenários considerados .

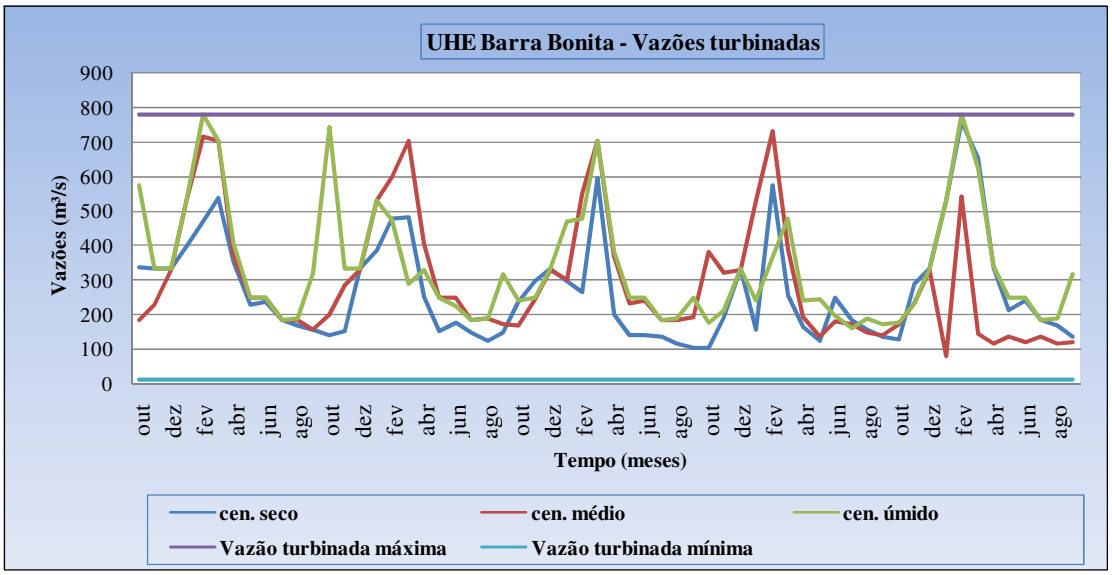


Figura 33 – Variação dos valores de vazões turbinadas.

As maiores vazões turbinadas ocorreram no cenário úmido, alcançando em alguns meses seu limite máximo. Os valores para os três cenários variam simultaneamente com a

ocorrência de períodos chuvosos (janeiro a abril) apresentando valores elevados, e os períodos de estiagem (maio à setembro) apresentando valores mais baixos. Isto se deve pelo fato ocorre da geração de energia ser menor nestes meses de estiagem.

A variação dos valores de vazões vertidas para os três cenários considerados foram as seguintes (Figura 34).

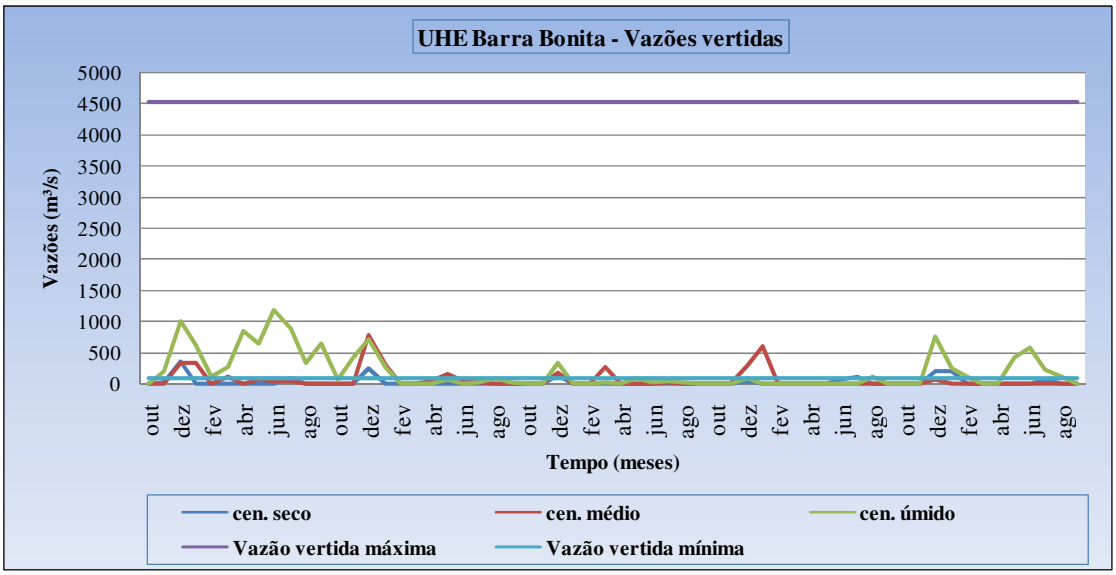


Figura 34 – Variação dos valores de vazões vertidas.

Devido à maximização da geração de energia, quase não houve vertimentos nos cenários seco e médio, sendo estes vertimentos isolados. No cenário úmido houve um maior número de vertimentos, mas com bastante falhas no decorrer do tempo.

A Figura 35 apresenta a variação dos valores das vazões liberadas pelo reservatório, considerando a soma das vazões vertidas e turbinadas nos três cenários considerados.

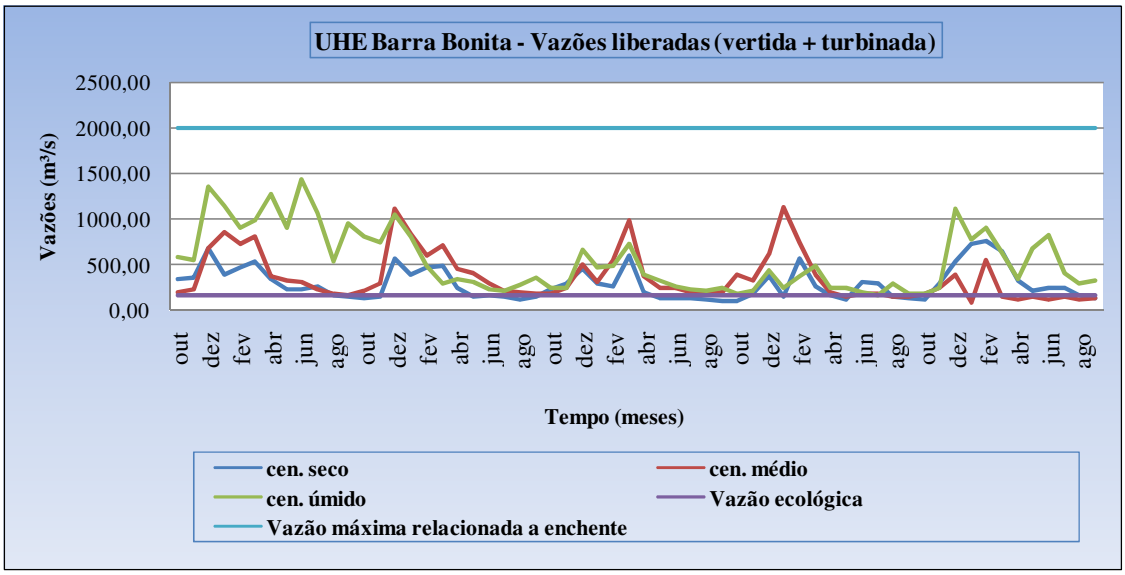


Figura 35 – Variação dos valores de vazões liberadas pelo reservatório.

Todos os três cenários analisados mantiveram-se dentro do limite máximo recomendado para vazões relacionadas a enchentes. No cenário seco, as vazões liberadas ficaram abaixo da vazão ecológica (160 m³/s) no período de estiagem (abril a setembro). No cenário médio, as vazões estiveram abaixo da vazão ecológica, no final do período de tempo, sendo que no cenário úmido essas vazões liberadas ficaram todo tempo dentro do limite da vazão ecológica. Entretanto, em alguns meses, essas vazões ultrapassaram os 1300 m³/s, o que ocasiona dificuldade na navegação devido à formação de ondas.

Os resultados de energia gerada pela UHE nos três cenários considerados são apresentados na Figura 36.

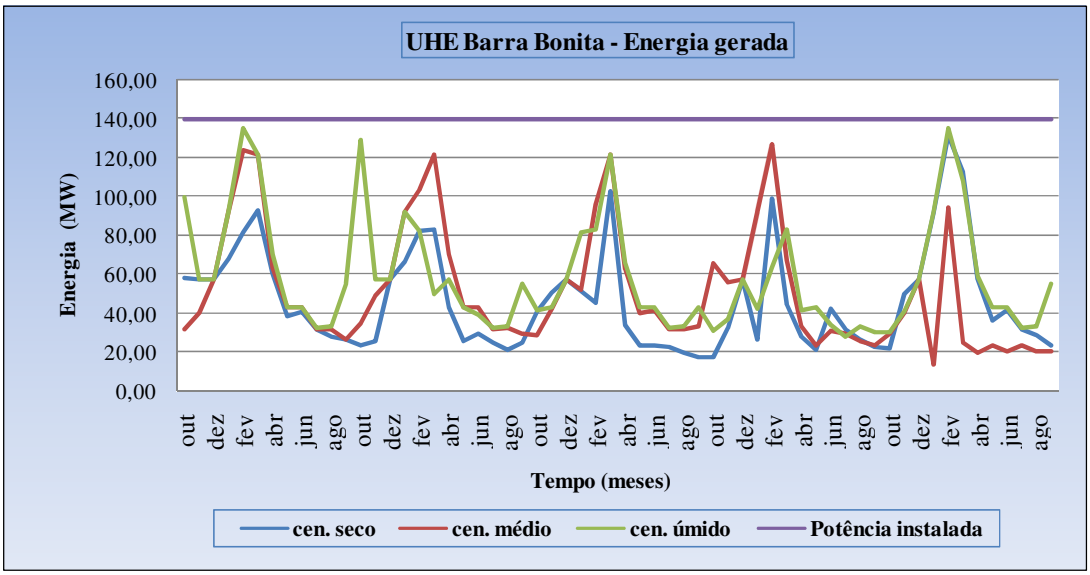


Figura 36 – Variação dos valores de energia gerada pela UHE

Em ambos os cenários, os valores de energia gerada variam proporcionalmente aos valores de vazão turbinada, além de apresentarem uma certa variação sazonal, entre períodos chuvosos e de estiagem. Observa-se que no cenário médio no final do período a energia gerada reduziu-se bastante, mas não chegando ao limite mínimo (10 MW). Todos os cenários se mantiveram entre os limites máximo e mínimo de geração de energia.

Na Tabela 27 tem-se os valores médios de todos os fatores analisados para o período de cálculo que foi utilizado na otimização (5 anos) e para os três cenários considerados.

Tabela 27 – Valores médios de todos os fatores analisados (período de 5 anos).

Fatores analisados	Cenário seco	Cenário médio	Cenário úmido
Armazenamento no final do período (hm³)	2066	2160	2179
Variação no nível da água (m)	449,82	450,15	450,20
Vazões turbinadas(m³/s)	269,01	296,86	337,59
Vazões vertidas (m³/s)	25,18	60,81	192,68
Vazões liberadas (m³/s)	294,19	357,67	530,26
Energia gerada (MW- Médio)	46,56	51,38	58,43

Observa-se que no período houve um aumento dos valores de um cenário para outro, devido à alteração das vazões afluentes. Mesmo não variando as vazões de eclusagem, pois estas teriam que ser atendidas sempre, os valores médios encontrados para o período foram satisfatórios. Apenas as vazões vertidas no cenário seco e médio estiveram bem abaixo do valor de restrição.

Mesmo com a otimização da geração de energia, a navegação que é outro uso importante do reservatório não foi prejudicada, pois o armazenamento médio do reservatório no final do período e a variação média do nível da água se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pelas restrições operativas do sistema. Apenas os vertimentos mínimos para vazão ecológica foram prejudicados nos cenários seco e médio.

Comparando-se a média de energia gerada pelo modelo de otimização para o período seco (46,56 MW- Médio) com a média de energia gerada pela Usina Hidrelétrica de Barra Bonita nos anos de 2001 a 2005 (45,28 MW- Médio), observa-se que mesmo no período seco houve incremento da geração de energia.

4.3. Análise espaço-temporal dos parâmetros de qualidade da água do reservatório

Na gestão de sistemas hídricos, é imprescindível o conhecimento quantitativo e qualitativo dos recursos disponíveis. Dessa forma, a adequada estimativa desses recursos constitui uma etapa de grande importância no planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Segundo Prado (2004), no final da década de 1980, os estudos eram baseados em amostras coletadas em apenas um ponto ou poucos pontos ao longo do reservatório, o que dificultava a interpretação da situação analisada. Outro aspecto desvantajoso é que em épocas passadas não se obtinha uma localização precisa do ponto de amostragem, pois não se dispunha de dispositivos como o Sistema de Posicionamento Global – GPS.

Analisando o contexto anterior, o presente trabalho buscou realizar uma análise espacial de 30 pontos de amostragem ao longo do reservatório de Barra Bonita (Figura 37), nas estações seca e chuvosa do ano de 2006, aferindo parâmetros básicos de qualidade da água (temperatura, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido (OD), potencial hidrogeniônico (pH) e turbidez), a uma profundidade de 30 cm da lâmina d'água.

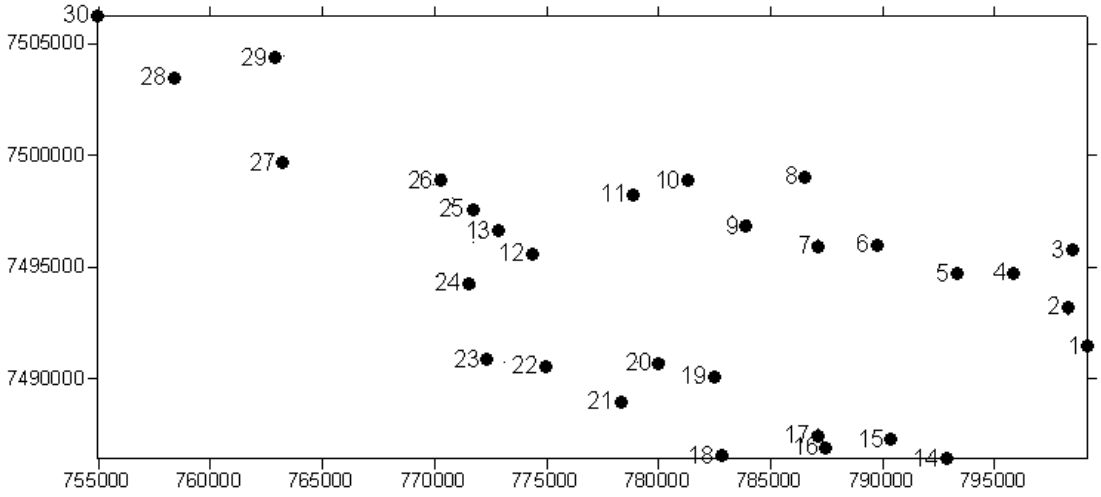


Figura 37 - Localização dos pontos de amostragens de água no reservatório de Barra Bonita.

Analisou-se o enquadramento dos 30 pontos de amostragem ,segundo os padrões da Resolução CONAMA Nº 357/2005, para águas de classe II, considerando a sazonalidade (período seco e chuvoso). As Figuras (38 a 42) apresentam os resultados.

Os resultados de temperatura (Figura 38) já eram esperados, com maiores valores no mês de novembro (primavera) e menores no mês de julho (inverno).

Quanto ao parâmetro condutividade elétrica (Figura 39), os resultados demonstraram que os valores são maiores no período chuvoso para maioria dos pontos analisados, indicando que nesse período há um aumento da carga poluidora de fontes difusas que chegam ao reservatório.

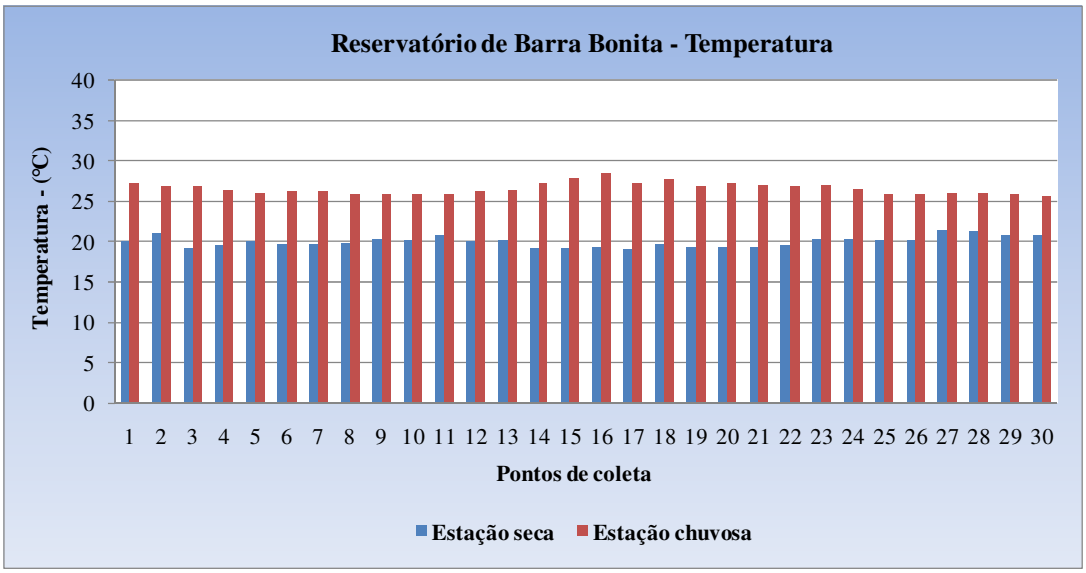


Figura 38 - Temperatura da água nas estações seca e chuvosa (2006).

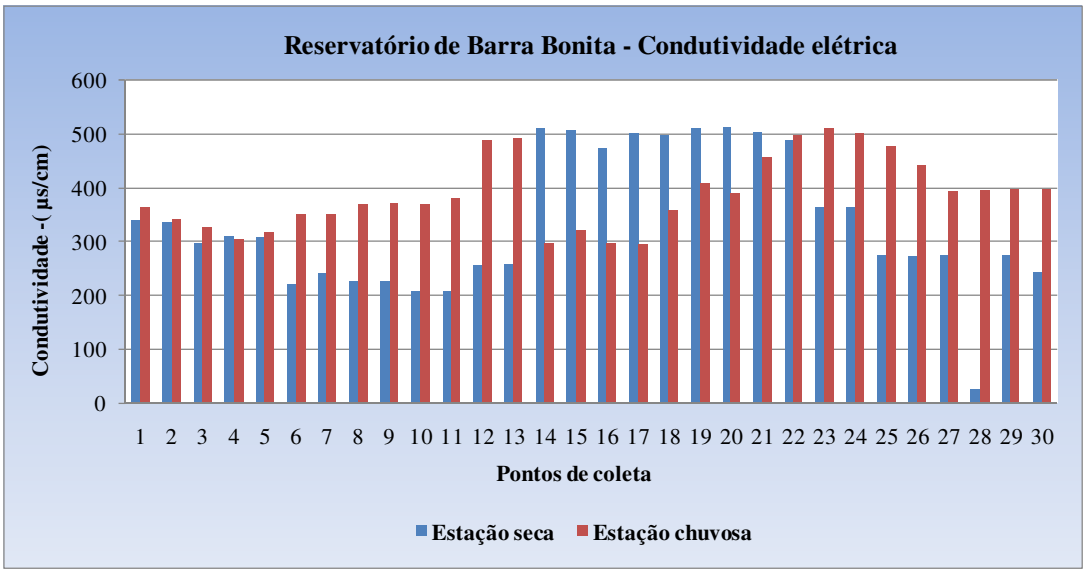


Figura 39 - Condutividade elétrica nas estações seca e chuvosa (2006).

Para o oxigênio dissolvido (Figura 40), obteve-se maiores valores na estação seca. Observa-se que, nesta estação apenas cinco pontos ficaram fora do padrão da Resolução CONAMA Nº 357/2005 para águas de classe II (OD ≥ 5 mg/L). O mesmo não aconteceu com a estação chuvosa, onde 56,66% dos pontos tiveram seus valores abaixo do padrão da respectiva Resolução Nº 357 do CONAMA. Isto pode ter sido provocado pelo predomínio de

transporte de materiais alóctones ou mesmo a ressuspensão do material de fundo do reservatório.

O valores de potencial hidrogeniônico (Figura 41), para todos os pontos analisados encontraram-se dentro do padrão da Resolução Nº 357 do CONAMA para águas de classe II (pH entre 6 e 9).

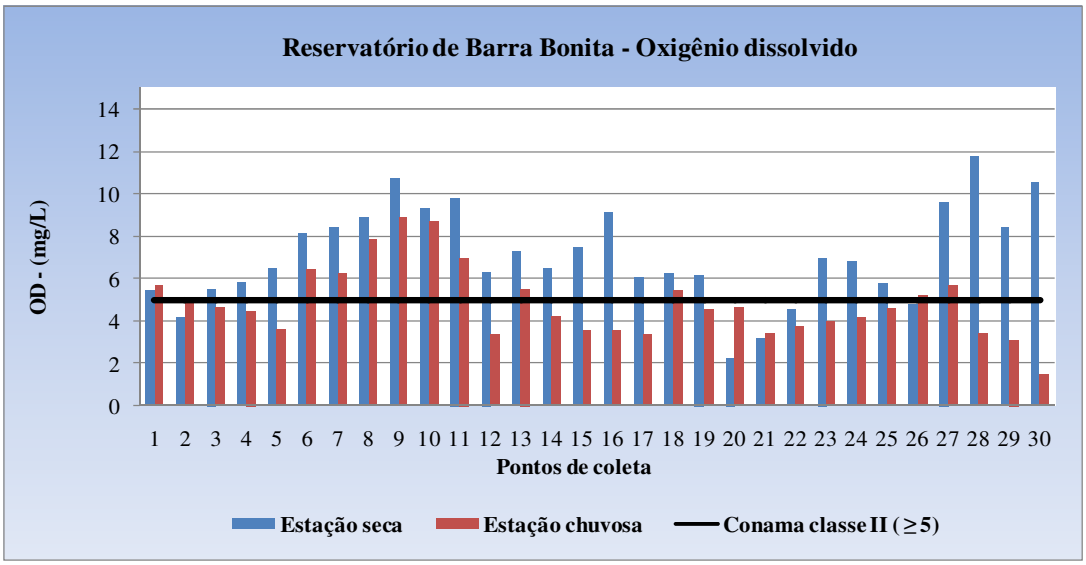


Figura 40 - Oxigênio dissolvido nas estações seca e chuvosa (2006).

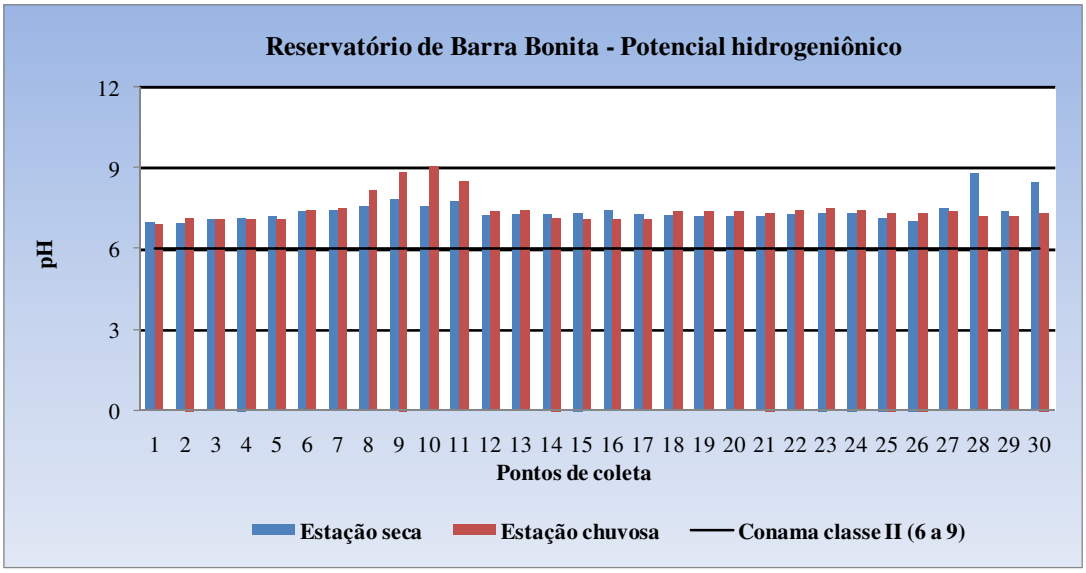
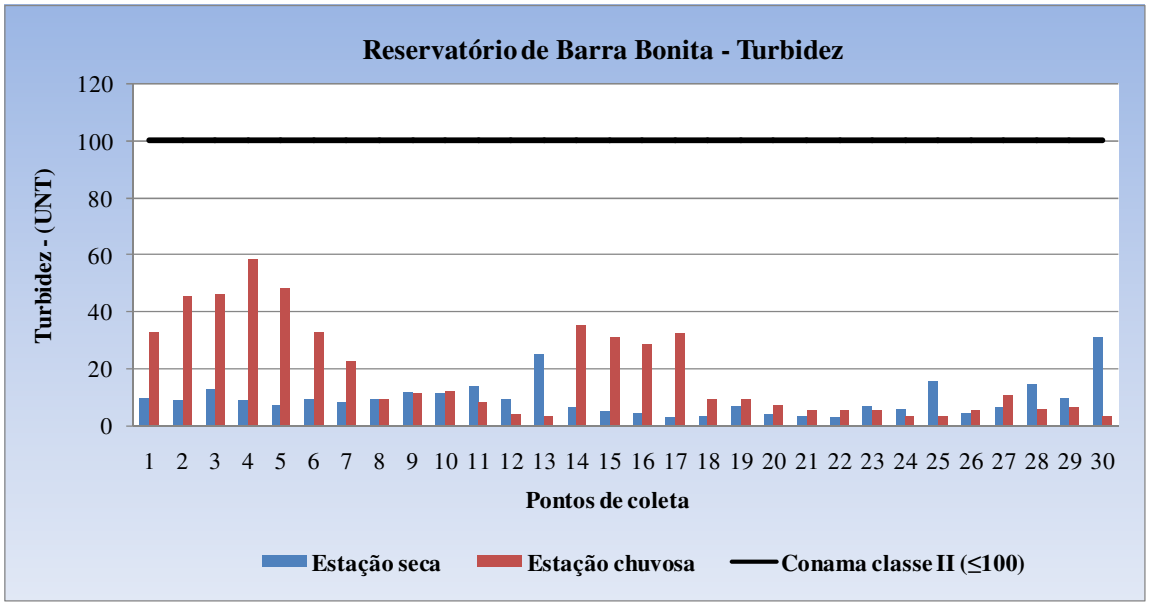


Figura 41 – Potencial hidrogeniônico (pH) nas estações seca e chuvosa (2006)

Quanto a turbidez, todos os pontos analisados ficaram dentro do padrão da Resolução CONAMA Nº 357/2005 para águas de classe II (turbidez ≤ 100 UNT). Observa-se que na estação seca o ponto 13 (encontro dos braços dos rios Tietê e Piracicaba) e o ponto 30 (barragem) apresentaram valores altos de turbidez, isto ocorreu devido à presença de macrófitas e plâncton em geral. Na estação chuvosa os valores altos de turbidez ocorreram nos pontos 2, 3, 4, 5 (braço do rio Piracicaba) e pontos 14, 15, 16 e 17 (braço do rio Tietê), devido à presença de sólidos em suspensão, tais como partículas inorgânicas (areia, silte e argila) e detritos orgânicos (algas e plâncton).



Figuras 42 – Turbidez nas estações seca e chuvosa no ano de 2006.

A seguir, são apresentados os mapas gerados pelo software Surfer para cada uma das variáveis aferidas (temperatura, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, potencial hidrogênionico e turbidez), para análise do reservatório por compartimentos.

Em relação à temperatura, foram encontrados valores mais altos no compartimento da barragem, no corpo central e no começo do compartimento do braço do rio Piracicaba durante a estação seca; para a estação chuvosa as maiores temperaturas registradas foram no começo do compartimento do braço do rio Tietê (Figuras 43 e 44).

A temperatura média de todos os compartimentos do reservatório para estação seca foi de 19°C e 26°C para estação chuvosa. Essa diferença é normal, em função da sazonalidade e pode ter sido influenciado em menor escala pelo horário de amostragem dos dados, pois os dados da área da barragem foram aferidos no período da tarde na estação seca, quando a temperatura é mais elevada. A variação da média entre os dois períodos se dá devido à estação seca ocorrer no inverno, onde as temperaturas no reservatório são mais baixas e a estação chuvosa no verão, quando as temperaturas são mais altas.

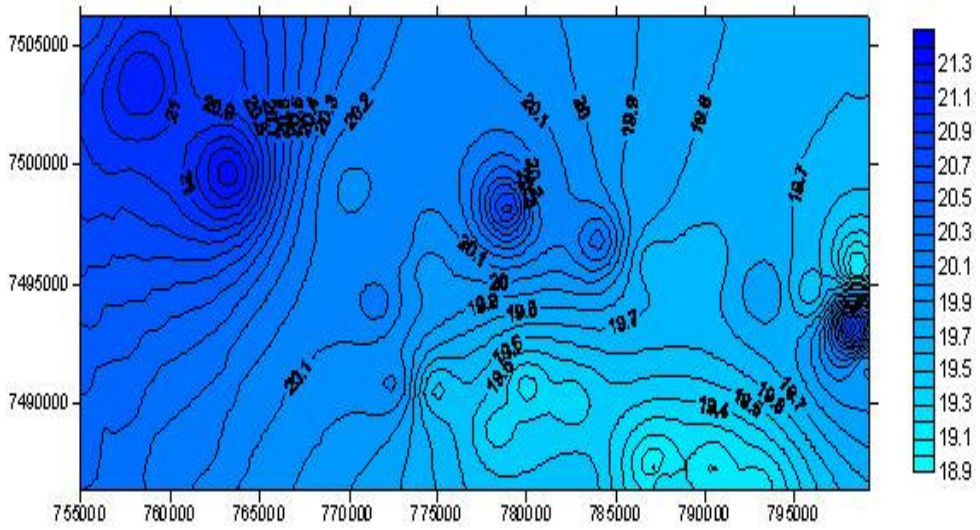


Figura 43 – Temperatura (°C), estação seca.

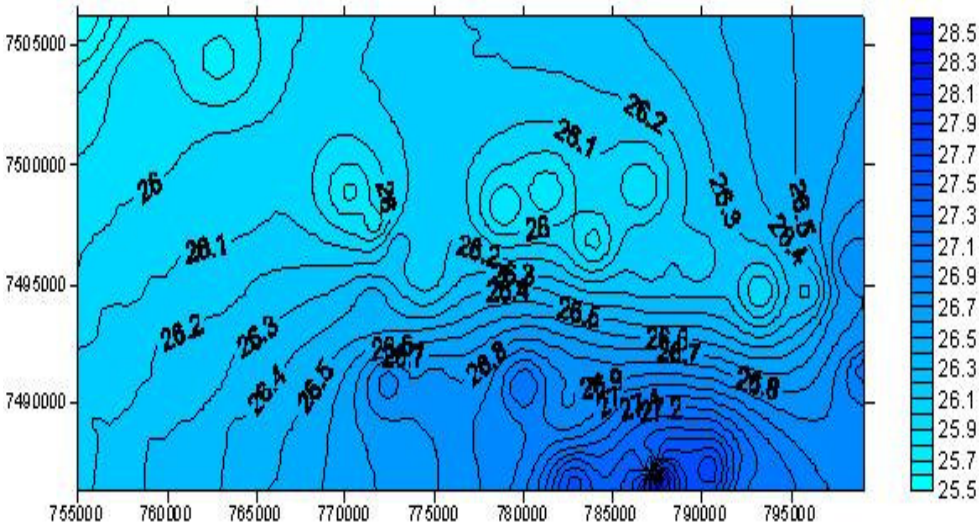


Figura 44 – Temperatura (°C), estação chuvosa.

Nas Figuras 45 e 46, são apresentados os valores de condutividade elétrica para as estações seca e chuvosa, por compartimento. O aspecto mais notável ao se analisar esta variável no reservatório espacialmente, é verificar a intensificação do aumento dos valores no compartimento do braço do rio Tietê. Na estação seca, a elevação dos valores de condutividade elétrica, ocorre ao longo de todo braço do rio Tietê e na estação chuvosa ela se acentua já no final do braço, quase no encontro dos braços dos rios Tietê e Piracicaba.

Os resultados indicaram estar havendo um transporte maior de íons neste compartimento, provenientes da bacia do Médio Tietê, o que leva a um aumento da condutividade elétrica. Provavelmente, este fato ocorre devido ao lançamento de resíduos industriais e domésticos das cidades a montante do reservatório e, também a contribuição de afluentes contaminados por esgotos de outros grandes centros urbanos, como a cidade de Sorocaba.

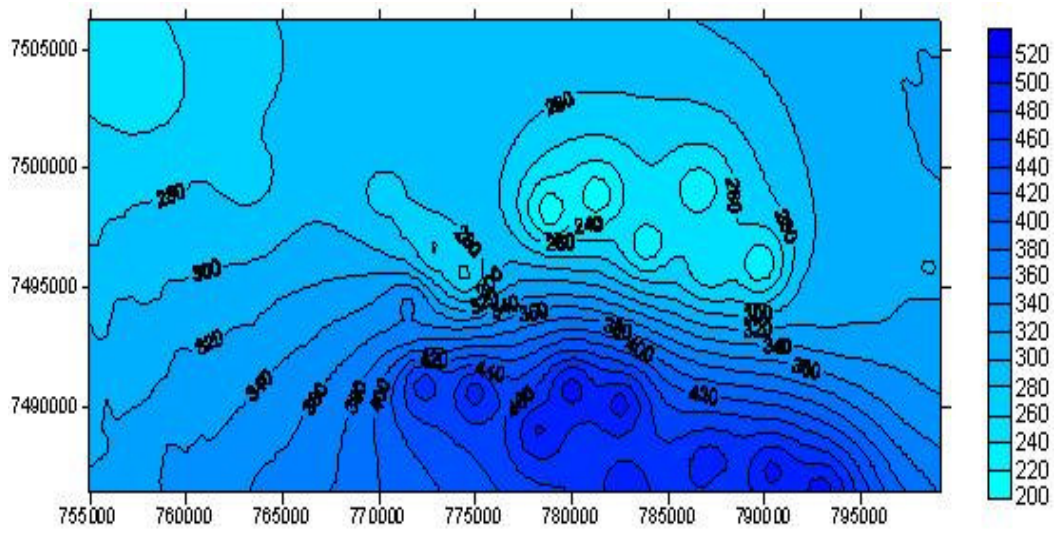


Figura 45 - Condutividade elétrica (µS/cm), estação seca.

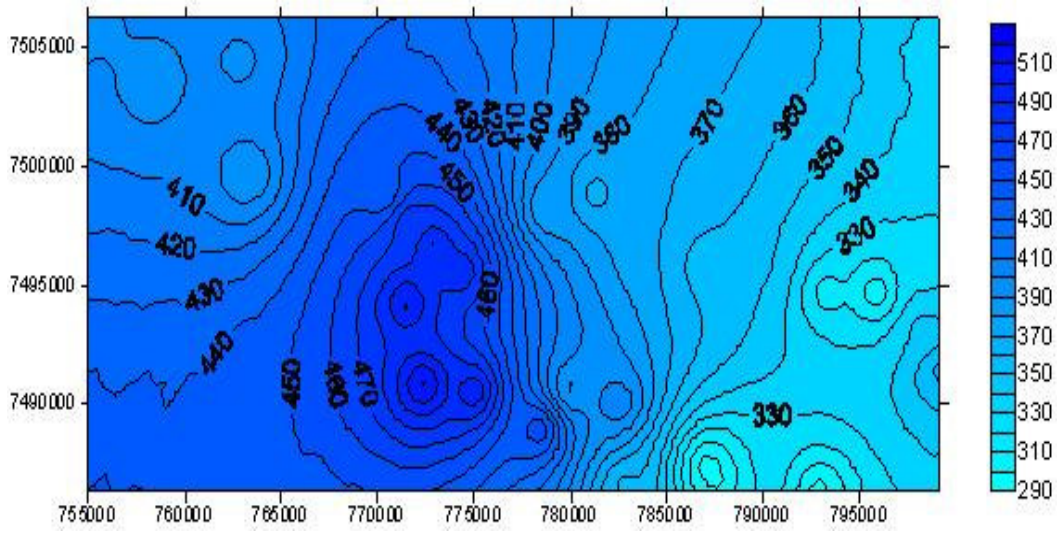


Figura 46 - Condutividade elétrica (µS/cm), estação chuvosa.

No que se refere ao oxigênio dissolvido, as maiores porcentagens de saturação no período seco foram encontradas no compartimento da barragem e no final do braço do rio Piracicaba, sendo que no período chuvoso estas se acentuaram apenas no final do braço do rio Piracicaba, conforme Figuras 47 e 48. No período das chuvas, ocorre no fluxo vertical o predomínio de transporte de materiais e a ressuspensão do material de fundo. Nesta época, há turbulência na parte mais profunda provocada pelas vazões turbinadas, a entrada de material alóctone e as elevadas temperaturas propiciam uma demanda maior de oxigênio dissolvido (CALIJURI, 1999).

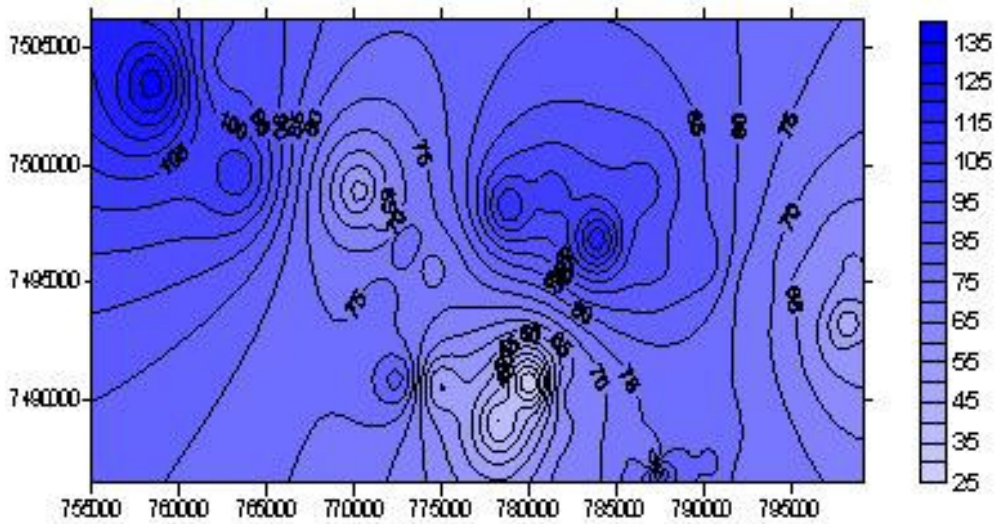


Figura 47 – Oxigênio dissolvido (% de saturação), estação seca.

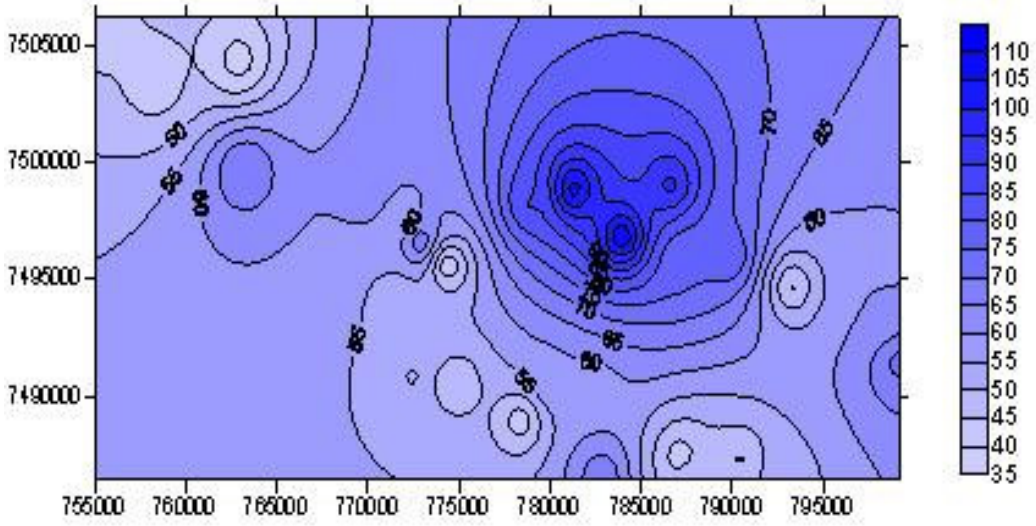


Figura 48 – Oxigênio dissolvido (% de saturação), estação chuvosa.

Quanto ao potencial hidrogeniônico (pH), os maiores valores ocorreram no compartimento da barragem na estação seca, sendo que na estação chuvosa estes valores aconteceram no encontro dos braços dos rios Tietê e Piracicaba, conforme as Figuras 49 e 50. Calculou-se uma média dos valores de todos os pontos de coleta do reservatório, foi verificado que na estação chuvosa os valores foram levemente mais elevados (7,47) que na estação seca (7,42). Estes resultados se devem provavelmente ao aumento da entrada de nutrientes no ecossistema em épocas chuvosas, por meio do escoamento superficial. Os resultados que não seguiram esse comportamento se devem às alterações que ocorrem no sistema como a estratificação térmica.

Os valores de pH estão relacionados também à entrada de ácidos orgânicos e inorgânicos no meio aquático, à chuva consideravelmente ácida, além da sua relação com as comunidades aquáticas. Quanto maior for a biomassa vegetal em relação à massa d'água, maiores e mais rápidas alterações ocorrerão no pH do meio. Assim, pode-se esperar que durante um período de 24 horas, possam ocorrer variações de pH no mesmo ecossistema aquático (PRADO, 2004).

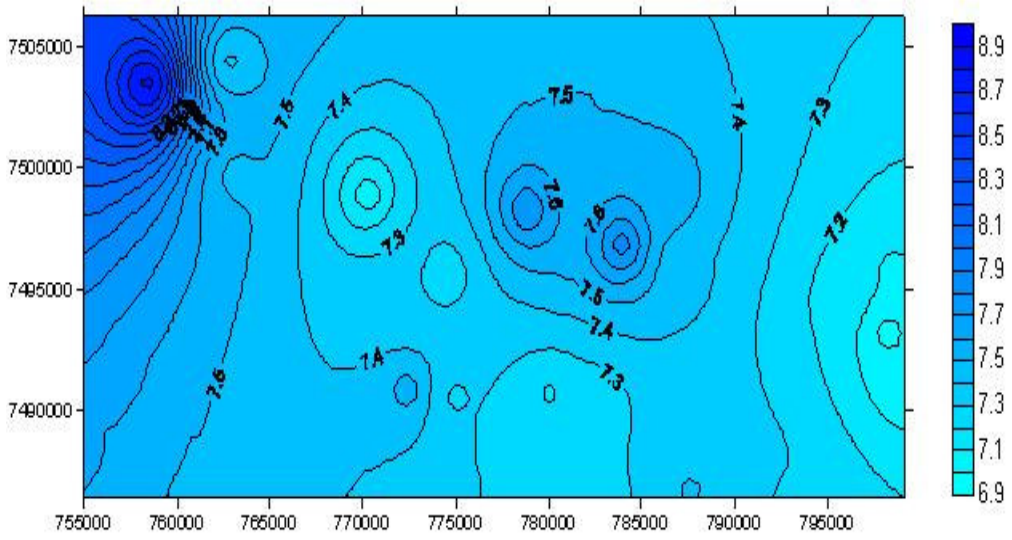
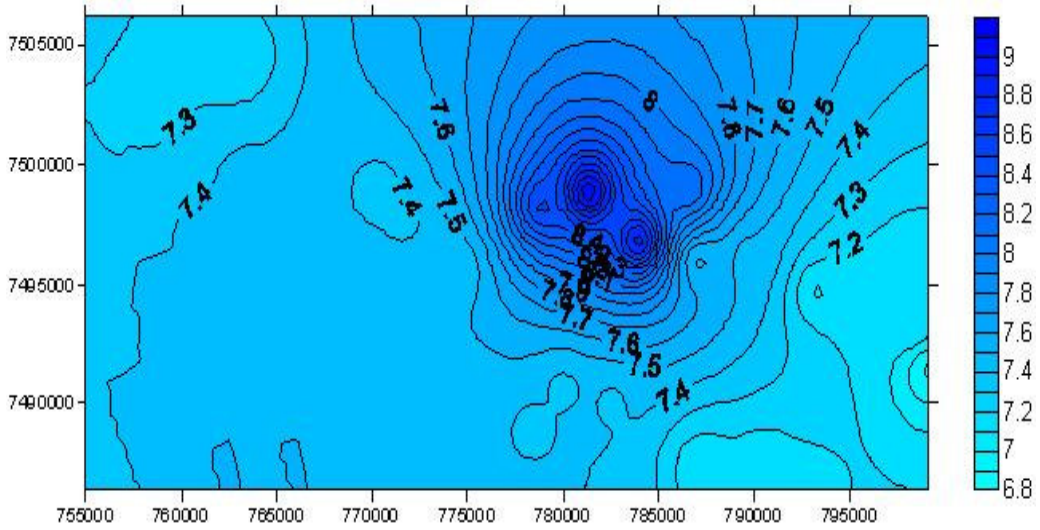
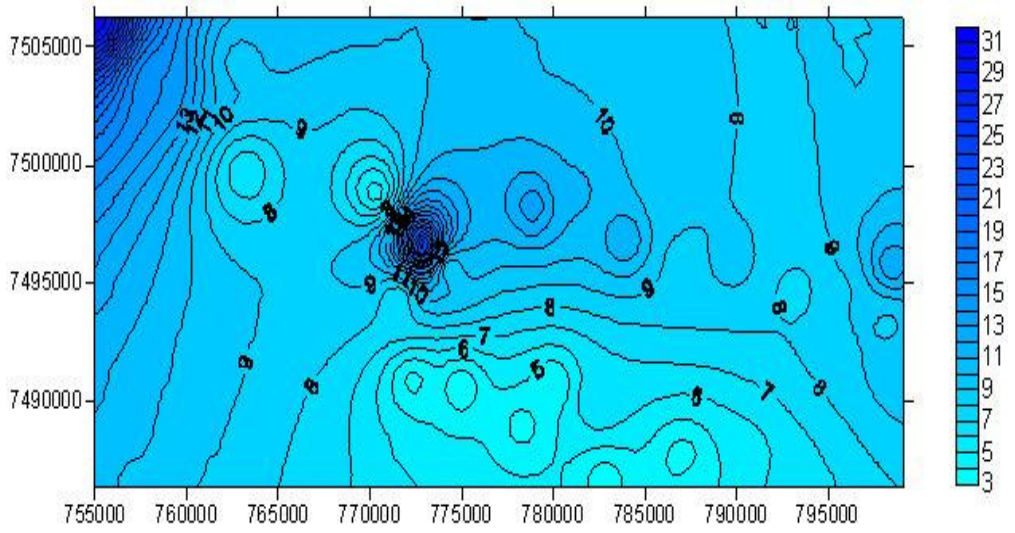


Figura 49 - Potencial hidrogeniônico, estação seca.

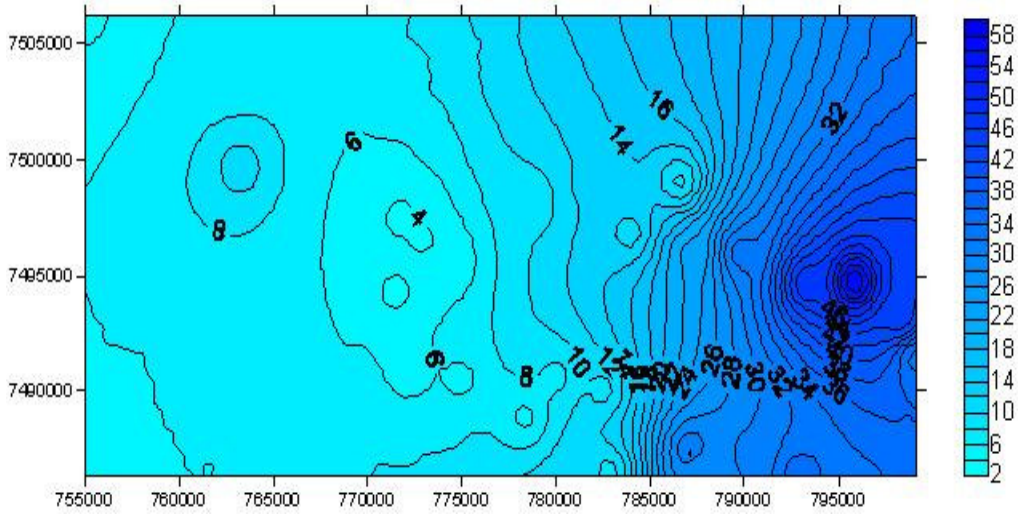


Figuras 50 - Potencial hidrogeniônico, estação chuvosa.

Registrou-se altos valores de turbidez na junção dos braços dos rios Tietê e Piracicaba e no compartimento da barragem na estação seca. Na estação chuvosa os maiores valores foram registrados no começo do compartimento dos braços dos rios Tietê e Piracicaba (Figuras 51 e 52). As médias para todos os pontos de coleta do reservatório foram de 345,23 UNT e 388,23 UNT para estação seca e chuvosa, respectivamente.



Figuras 51 - Turbidez (UNT), estação seca.



Figuras 52 - Turbidez (UNT), estação chuvosa.

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo, as principais conclusões do trabalho são apresentadas conforme a seqüência dos resultados.

Através da descrição do local de estudo, pode-se perceber que se trata de um sistema complexo de recursos hídricos, sendo importante uma análise da operação e do desempenho do reservatório segundo a ótica dos usos múltiplos da água. Dado que, em muitos sistemas há uma competição pela água entre os diversos usuários, este tipo de enfoque leva inevitavelmente à determinação de regras para partilha deste recurso natural. Essas regras são geralmente definidas a partir de métodos e critérios de alocação do recurso hídrico para cada setor usuário.

Neste contexto, foram realizadas simulações computacionais para análise dos usos múltiplos da água do reservatório considerando 3 cenários distintos. Observou-se que no cenário 3 (geração de energia tem prioridade sobre a navegação), os outros usos da água, possuem índices de desempenho muito baixos, exceto a geração de energia, sendo descartado este cenário. O cenário 1 (geração de energia e a navegação tem a mesma prioridade) e o cenário 2 (navegação tem prioridade sobre a geração de energia), apresentaram valores de índices de desempenho bem similares. Entretanto, o cenário 1 foi escolhido como o melhor entre os três cenários, pois dá igual prioridade aos principais usos da água do reservatório (geração de energia e navegação). O software MIKE BASIN mostrou-se versátil e uma boa ferramenta para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, pois representa um sistema de recursos hídricos de forma adequada.

O modelo de otimização foi desenvolvido através da solução de problemas de programação não-linear, sendo a principal contribuição do trabalho. Para tanto, foram utilizadas as ferramentas de programação matemática GAMS para elaboração do modelo e o

pacote de otimização MINOS para solução do problema. O GAMS permitiu a elaboração do modelo utilizado neste trabalho com rapidez e flexibilidade. O uso do MINOS foi também benéfico, pois é um pacote que se demonstrou adequado à solução do problema proposto. Outro aspecto a ser destacado na integração GAMS/MINOS é a facilidade para alteração de dados.

Foi realizada a otimização da geração de energia pela UHE Barra Bonita, através do modelo proposto, considerando três cenários hidrológicos diferentes, com extensão de 5 anos cada um, a partir das séries históricas de vazões afluentes ao reservatório de Barra Bonita. Esses cenários foram denominados como seco, médio e úmido. Pode-se observar que nos três cenários foi possível manter os volumes e os níveis do reservatório, dentro dos limites relacionados ao armazenamento e à navegação. As vazões turbinadas e vertidas também se mantiveram dentro dos limites físicos impostos pelo engolimento máximo das turbinas e a capacidade dos vertedores, respectivamente. No caso das vazões liberadas, em alguns momentos não foi possível atingir o valor mínimo da vazão ecológica. Os valores médios de energia gerada, também se mantiveram dentro dos limites físicos impostos pela potência instalada da UHE e observou-se que, mesmo no período seco, houve um incremento da média de energia gerada (46,56 MW- Médio) em relação a média de produção da UHE Barra Bonita nos anos de 2001 a 2005 (45,28 MW- Médio).

Em relação à análise dos parâmetros de qualidade da água do reservatório, o parâmetro que apresentou uma tendência de degradação da qualidade da água foi a condutividade elétrica. A sazonalidade influi bastante na turbidez da água do reservatório, pois na estação chuvosa os compartimentos dos rios Piracicaba e Tietê apresentaram valores bem mais altos que na estação seca. Ao considerar o reservatório de Barra Bonita como um sistema aquático com compartimentos diferenciados quanto à qualidade da água e entrada de poluentes, concluiu-se que o braço do rio Tietê é o que apresenta piores valores para as

variáveis analisadas, devido ao lançamento de esgotos domésticos e industriais dos grandes centros urbanos. O software Surfer é uma ferramenta utilizada na análise espaço-temporal da qualidade da água, cujo tipo de análise deve ser aliada ao conhecimento sobre as características e condições ambientais da área de estudo.

A aplicação de várias técnicas para o gerenciamento de recursos hídricos mostrou-se importante, para uma análise quanti-qualitativa do sistema. As técnicas de simulação representam melhor fisicamente o sistema, enquanto que os modelos de otimização são mais flexíveis aos diversos meios de formulação. No entanto, ambas as técnicas devem ser aplicadas para possibilitar uma análise mais detalhada do sistema de recursos hídricos em estudo.

Quanto à realização de trabalhos futuros relacionados com a linha de pesquisa enfocada neste estudo, pode-se indicar: utilização de outros modelos de simulação para avaliar os usos múltiplos de reservatórios; levantar as vazões utilizadas para irrigação, incorporando este uso no modelo de otimização; testar o modelo de otimização, através de uma análise estocástica da operação do reservatório e comparar com os resultados obtidos a partir das séries históricas; implementar uma interface de entrada de dados e saída de resultados entre as técnicas utilizadas no estudo, resultando em um sistema de suporte à decisão para o gerenciamento de reservatórios.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, A. S. O., ANDRADE, P. R. G. S., CURI, R. C. E CURI, W. F. **Uma análise da operação de um sistema de cinco reservatórios do Alto Capibaribe, Pernambuco**. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, Curitiba. Porto Alegre, RS: ABRH, 2003.

AES Tietê (2006). Usina Hidrelétrica de Barra Bonita. Disponível em: http://www.aestiete.com.br. Acesso em janeiro de 2006.

ALBERTIN, L. L. **Avaliação da quantidade e qualidade dos recursos hídricos superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí-Mirim (SP) através do simulador computacional MIKE BASIN**. 2004. 160p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2004.

AZEVEDO, L. G. T.; GATES, T. K.; FONTANE, D. G.; LABADIE, J. W.; PORTO, R. L. Integration of Water Quantify and Quality in Strategic River Basin Planning. **Water Resources Planning and Management**, v. 126, n. 2, p. 85-97. 2002.

BARBOSA, P. S. F. **Planejamento da operação de um sistema de reservatórios múltiplos para geração hidroelétrica**. 1986. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

BECKER, L.; YEH, W. W. G. Optimization of real time operation of a multiple reservoir system. **Water Resources Research**, v.10, n.6, p.1107-1112, Dec. 1974.

BARROS, M. T. L.; TSAI, F. T. C.; YANG, S. L.; LOPES, J. E. G.; YEH, W. W. G. Optimization of large-icale hydropower systems operations. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.129, n.3, p.178-188, May. 2003.

BELLMAN, R. E. **Dynamic programming**. New Jersey: Princeton University Press, 1957.

BRAGA, B. P. F.; BARBOSA, P. S. F.; BARROS, M. T. L. Siscom: sistema computadorizado de apoio ao planejamento e operação de sistemas hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.3, n.4, p.89-101. 1998

BRAGA, B. P. F.; YEH, W. W. G.; BECKER, L.; BARROS, M. T. L. Stochastic optimization of multiple-reservoir-system operation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.117, n.4, p.471-481. 1991.

BRANDÃO, J. L. B. **Modelo para operação de sistemas de reservatórios com usos múltiplos**. 2004. 182 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BRASIL. Congresso. Senado. Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Disponível em: <http: //www.mma.gov.br/conama/>. Acesso em julho de 2008.

BRASIL. Lei nº 9.433, 08 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional dos recursos hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.serla.rj.gov.br/outorga/pdf/lei.pdf>. Acesso em agosto de 2008.

BROOKE, A. et. al. GAMS: A user's Guide. Washington-DC: GAMS Development Corporation, December 1998.

CALIJURI, M. C. **Respostas fisioecológicas da comunidade fitoplanctônica e fatores ecológicos em ecossistemas com diferentes estágios de eutrofização**. 1999. 293p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.

CALIJURI, M. C.; TUNDISI, J. G. Limnologia Comparada das Represas do Lobo (Broa) e Barra Bonita - Estado de São Paulo: Mecanismos de Funcionamento e Bases para o Gerenciamento. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 50, n.4, p. 893-913. 1990.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2007. 318 p.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. **Relatório da Situação dos Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí**. Volumes I, II, III e IV. 2004.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SOROCABA/MÉDIO TIETÊ (2000). **Relatório Zero: Relatório da Situação Atual dos Recursos Hídricos na Bacia hidrográfica.** Disponível em http://www.sigrh.sp.gov.br. Acesso em Março de 2007.

CORRÊA, C. R. R. **Avaliação de conflitos de usos múltiplos de água na bacia hidrográfica do rio Jaguari - SP, através de simulação computacional**. São Carlos. 107 p. Dissertação (Mestrado e Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

COSTA, J. B. **Avaliação ecotoxicológica da água e sedimento de tributários do reservatório de Barra Bonita (médio Tietê Superior - SP).** 2001. 165p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

DAEE (2006). **Sistema de Informações para Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo.** Plano Estadual de Recursos Hídricos. Banco de Dados. Disponível em: <http://www.sigrh.gov.br> Acesso em fevereiro de 2008.

DNTI (2007). **Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Hidrovias e Portos**. Disponível em: http://www.dnit.gov.br/menu/hidrovias_portos. Acesso em maio de 2007.

DYRBAK, L. **Reservoir operation optimization. Department of hydrodynamics and Water Resources**. Technical University of Denmark, July 2000. http://www.dhisoftware.com/mikebasin/publications/index.htm. Acesso em novembro de 2006.

ERSHADI, A., KHIABANI, H., E LORUP, JK. **Applications of Remote Sensing, GIS and River Basin Modelling in Integrated Water Resource Management of Kabul River Basin** 2005. ICID 21st European Regional Conference 2005 - 15-19 May. 2005 - Frankfurt.

FRANCATO, A. L.; BARBOSA, P. S. F. **Fatores determinantes das propriedades operativas ótimas de um sistema hidroelétrico**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória. 1997. Anais. Porto Alegre: ABRH, 1997

GOOGLE EARTH. **Imagem de Satélite do Reservatório de Barra Bonita**. Disponível em: http://earth.google.com/intl/pt. Acesso em maio de 2007.

Guide to Getting Started Tutorial (2000). http://dhi.dk/gishidro/mikebas/mbasbody.htm. Acesso em julho de 2006.

HASHIMOTO, R.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. Reliability, Resiliency and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation. **Water Resources Research,** v.18, n.1, p. 14-20. 1982.

HATHHORN, W. E.; TUNG, Y. K. Assessing the risk of violating stream water-quality standards. **Journal of Environmental Management**, v. 26,p.321-338. 1988.

HERMANN, R. M. **Dimensionamento e operação de sistemas com reservatórios múltiplos**. 1971. 105p. Tese de Livre Docência – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1971.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to operations research**. New York: MacGraw-Hill, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE (2007). Cidadesat. Disponível em: < http://www.ibge.gov.br/cidadesat>. Acesso em: 03 abr. 2009.

KELMAN, J.; STENDINGER, J. R.; COOPER, L. A.; HSU, E.; YUAN, S. A. Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir operation. **Water Resources Research**, v. 26, n.3, p.447-454, Mar. 1990.

KJELDSEN, T. R.; ROSBJERG, D. A Framework for Assessing the Sustainability of Water Resources System. **Regional Management of Water Resources**. Proceedings of a symposium held during the 6th IAHS Scientific Assembly at Maastricht, The Netherlands, July 2001. IAHS Publ. n. 268.

LABADIE, J.; BRAZIL, L. E.; CORBU, I.; JONSON, L. E. **Computerized decision support systems for water managements**. ASCE, New York. 1989.

LABADIE, J. **Combining simulation and optimization in river basin management**. In: MARCO, J. et al. (Ed.) Stochastic hydrology and its uses in water resources systems simulation and optimization. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1993. P.345-371.

LANDIM, P. M. B.; MONTEIRO, R. C.; CORSI, A. C. **Introdução à confecção de mapas pelo software Surfer**. DGA, IGCE, UNESP / Rio Claro, Texto didático 08, 21 p. 2002.

LARSEN, H., MARK, O., JHA, M. K, AND DAS GUPTA, A. (2000). **The application of models in Integrated River Basin Management**, Internal publication, Asian Institute of Technology and DHI Water e Environment.

LIMA, G. **Aplicação de simulação computacional na análise dos conflitos entre os usos múltiplos da água na bacia do rio Atibaia no Estado de São Paulo**. 2002. 107p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – EESC/USP. São Carlos, 2002.

LIU, P.; GUO, S. L.; ZHANG, W. X.; XIAO, Y.; GAO, S. C. Derivation of optimal operating rules for cascade reservoirs**. Advances in Water Science**, v.18, n.6, p.816-822. 2007.

LOPES, J. E. G. **Otimização de sistemas hidroenergéticos**. 2001. 85 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

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** – subprojeto 4.4: determinação de subsídios para procedimentos operacionais dos principais reservatórios da bacia do São Francisco. Brasília: ANA/PNUMA/OEA, Novembro 2002.

LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A. **Water resources system planning and analysis**: Prentice-Hall Inc., 1981.

LOUCKS, D. P.; STEDINGER, K. A.; TAYLOR, M. R. **IRAS – Interactive River Aquifer Simulation**. Cornell University and Resources Planning Associates, Incorporated, Itacha, NY. 1995.

MAIA, J. L. **Estabelecimento de vazões de outorga na Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí, com a utilização de sazonalidade**. Itajubá. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2003.

MAIER, H. R.; LENCE, B. J.; TOLSON, B. A.; FOSCHI, O. First-order reliability method for estimating reliability, vulnerability, and resilience. **Water Resources Research**, v.37, n.3, p.779-790, Mar. 2001.

MARIÑO, M. A.; MOHAMMADI, B. Multiple reservoir operation: I. Monthly model for a single reservoir. **J. Hydrology**, v.69, n.1/4, p.1-14, Feb. 1984.

MARTIN, Q. W. Optimal reservoir control for hydropower on Colorado river, Texas. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.121, n.6, p.438-446, Nov/Dec. 1995.

MAUAD, F. F. **Planejamento integrado de recursos hidroenergéticos: O confronto de usos múltiplos da água no aproveitamento hidroelétrico de Alqueva em Portugal**. 2000. 182 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica , Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2000.

MAYS, L. W. **Water resources handbook**. New York: McGraw-Hill, 1996.

MONTEIRO, C. A. F. (1973). **A dinâmica climática e as chuvas do Estado de São Paulo: estudo em forma de atlas**. São Paulo: IGEOG/USP.

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).

NAYAK, S. C.; ARORA, S. R. Optimal capacities for a multi-reservoir system using the linear rule control. **Water Resources Research**, v.7, n.3, p.483-494, Jun. 1971.

OLIVEIRA, R.; LOUCKS, D. P. Operating rules for multireservoir systems. **Water Resources Research**, v.33, n.4, p.839-852, Apr. 1997.

OLIVEIRA, H. R. **Análise do aproveitamento múltiplo do reservatório de Barra Bonita - SP, através de aplicação de técnica de programação linear associada à modelo de rede de fluxo.** 2004. 147p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

ONS (2006). Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Vazões médias mensais nos aproveitamentos hidrelétricos período 1931 a 2004**. Disponível em: http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx. Acesso em julho de 2006.

OISHI, M. K. **Caracterização do meio físico, das características físicas e químicas e de fluxo de nutrientes em tributários da bacia hidrográfica do reservatório de Barra Bonita (Médio Tietê – SP)**. 1997. 199 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.1996.

PEIXOTO, L. S. **A utilização de simulação computacional no gerenciamento de usos múltiplos da água na bacia do Sapucaí/Grande no Estado de São Paulo**. 2002. 131p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

PENG, C. S.; BURAS, N. Dynamic operation of a surface water resources system. **Water Resources Research**, v. 36, n.9, p.2701-2709, Sep. 2000.

PONNAMBALAM, K.; ADAMS, B. J. Stochastic optimization of multireservoir systems using a heuristic algorithm: case study from India. **Water Resources Research**, v.32, n.3, p.733-741, Mar. 1996.

PRADO, R. B. **Análise espacial e temporal das alterações na qualidade da água do reservatório de Barra Bonita (SP) em função da dinâmica do uso da terra.** 2004. 172p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.

PROJETO BIOTA (2002). **Sub-bacias hidrográficas do Estado de São Paulo**. Disponível em: http://www.biotasp.org.br/biodiv/mapas/bacias. Acesso em dezembro de 2005.

RODGHER, S. **Estudos ecotoxicológicos e limnológicos nos reservatórios em cascata do médio e baixo Rio Tietê : uma análise espacial e temporal**. 2001. 159p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

SANDES, M. A. L. **Estudos ecológicos em florescimento de microcystis (Cyanobacteria-Cyanophyceae) e interações com a flora bacteriana na represa de Barra Bonita Médio-Tietê/SP.** 1998. 242p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.

SANTOS, S. C. D. **Alguns aspectos do ciclo do fósforo e eutrofização na Represa de Barra Bonita, SP.** 1996. 100p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

SÃO PAULO (Estado). Lei nº 7.663, 30 de dezembro de 1991. **Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Disponível em: http://www.recursoshidricos.sp.gov.br/Legislacao. Acesso em agosto de 2006.

SHIM, K. C.; FONTANE, D. G.; LABADIE, J. W. Spatial Decision Support System for Integrated River Basin Flood Control. **Journal of Water resources Planning and Management**, v. 128, n. 3, p. 190-201, May/June. 2002.

SIGRH (2002). **Sistema de Informações para Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo**. Plano Estadual de Recursos Hídricos. Banco de Dados. Disponível em: <http://www.sigrh.gov.br> Acesso em novembro de 2005.

SYLLA, C. A Penalty-Based Optimization for Reservoir System Management. **Computer ind. Eng**, v. 28, n. 2, p. 409-422, 1995.

TEJEDA-GUILBERT, J. A.; STEDINGER, J. R.; STASCHUS, K. Optimization of value of cvp's hydropower production. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 116, n.1, p.52-70, Jan. 1990.

TICKLE, K. S.; GOULTER, I. C. Statistical Properties of Reliability and Resiliency Measures. In: Stochastic and Statistical Methods in **Hydrology and Environmental Engineering**, v. 4, p. 209-220, editado por Keith W. Hipel and Liping Fang. 1994.

TU, M. Y.; HSU, N. S.; TSAI, F. T. C.; YEH, W. W. G. Optimization of Hedging Rules for Reservoir Operations. **Journal of Water Resources Planning. and Management**, v. 134, n.1, p. 3-13, Jan./Feb. 2008.

TUCCI, C. E. M; BELTRAME, L. F. S. **Evaporação e Evapotranspiração**. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) Modelos Hidrológicos. 1ª Edição. Editora Universidade, UFRGS, ABRH, Porto Alegre – RS. 1998.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. Limnology and eutrophication on Barra Bonita Reservoir, Sao Paulo State, Southern Brazil. **Hidrobiology**, v.33, p.661-667,1990.

VERHAEGUE, R. J.; KROGT, H.; MOST, H. **Simulation and optimization analysis of the water resources of the Tana River basin in Kenia**. Publ. Delft Hydraulics, n. 413, May, 1989.

WURBS, R. A. Reservoir system simulation and optimization models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.119, n.4, p.455-472, Jul/Ago, 1993.

WURBS, R. A. **Modeling and analysis of reservoir system operations**. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1996.

Yellow Spring Incorporation. **Manual de Sistemas de Monitoramento Ambiental**. (Junho, 2006).

YEH, W.W. G. Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review. **Water Resources Research**, v.21, n.12, p.1797-1818, Dec. 1985.

YEN, J.H.; CHEN, C.Y. Allocation Strategy Analysis of Water Resources Management. **Water Resources Research**, v.15, n.5, p.283-297, Oct. 2001.

ZAHED, F. K. **Algumas metodologias para o dimensionamento e operação de reservatórios**. 1984. 258p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

ANEXOS

Anexo A – Série de vazões médias mensais afluentes ao reservatório de Barra Bonita (m³/s)

Ano	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	MED
1931	955	1825	1206	847	557	411	325	267	379	341	351	849	693
1932	872	765	786	475	422	403	276	269	206	291	270	764	483
1933	653	544	395	270	289	232	198	168	184	203	158	268	297
1934	458	466	364	256	183	164	137	126	154	187	150	901	296
1935	457	854	693	425	260	259	195	200	326	764	346	349	427
1936	617	461	753	391	276	189	171	199	348	225	228	698	380
1937	1009	680	648	689	511	444	264	232	185	356	496	538	504
1938	556	451	467	388	310	257	205	228	254	403	360	555	370
1939	845	662	460	370	330	296	216	170	164	148	268	484	368
1940	888	1427	747	415	333	242	161	165	158	189	280	308	445
1941	458	283	289	254	152	137	159	122	252	364	408	511	282
1942	473	618	635	447	282	265	307	182	174	155	176	391	342
1943	462	567	559	320	201	192	156	143	166	292	323	264	304
1944	363	400	716	290	196	156	151	127	115	117	227	200	255
1945	232	699	364	243	183	369	327	170	158	145	312	356	297
1946	828	847	768	411	266	267	268	182	150	228	231	207	388
1947	803	1065	1255	505	373	302	301	280	357	359	307	800	559
1948	846	1021	1013	606	414	319	265	285	211	215	283	287	480
1949	481	728	504	443	293	262	222	174	163	157	197	537	347
1950	717	1331	859	633	430	318	265	195	167	339	295	461	501
1951	956	1076	1019	522	343	296	260	230	189	212	266	372	478
1952	435	715	765	409	266	336	241	198	197	206	284	208	355
1953	376	427	263	343	203	195	157	171	171	198	220	291	251
1954	424	610	463	286	358	274	186	140	120	175	137	192	280
1955	501	235	309	223	158	156	147	144	160	126	251	286	225
1956	334	352	420	272	407	497	286	413	238	259	186	220	324
1957	706	721	633	495	298	246	345	285	608	413	483	476	476
1958	613	861	939	633	656	651	412	288	335	345	454	505	558
1959	801	631	607	544	343	270	215	248	198	205	258	503	402
1960	939	848	903	451	399	334	257	206	176	233	312	949	501
1961	933	729	818	548	478	310	227	202	185	193	280	328	436
1962	386	670	1122	416	293	263	220	210	220	433	358	460	421
1963	1239	844	469	262	190	194	186	160	147	193	258	190	361
1964	127	637	214	185	197	135	157	133	142	237	231	580	248
1965	1270	1302	1129	472	570	317	332	244	195	478	429	842	632
1966	750	694	762	408	313	229	193	195	222	284	349	648	421
1967	908	958	758	437	287	355	263	177	243	294	412	513	467
1968	862	451	453	328	259	229	181	179	155	186	126	203	301
1969	202	196	217	172	100	152	92	94	91	246	567	348	206
1970	876	1502	836	450	351	269	216	203	336	280	230	346	491
1971	395	205	433	288	222	328	251	181	166	317	186	293	272
1972	704	1052	522	352	231	194	291	280	262	823	509	436	471
1973	596	625	427	466	292	241	246	197	206	310	423	604	386
1974	928	549	918	510	298	389	269	191	164	234	199	533	432
1975	686	909	604	314	217	150	174	122	101	226	328	718	379
1976	725	1106	849	638	601	797	790	629	739	777	588	635	740
1977	999	739	485	663	339	343	230	189	286	265	301	771	468
1978	495	359	498	204	254	296	262	168	180	161	562	552	333
1979	524	416	340	248	319	219	202	277	365	332	367	472	340
1980	587	758	524	537	275	267	235	201	216	207	234	609	388
1981	928	396	314	286	233	242	187	163	132	316	551	537	357
1982	738	787	669	431	288	639	490	350	281	610	584	1201	589
1983	1304	1725	1292	992	1004	2420	804	552	1023	873	785	870	1137
1984	908	572	364	417	378	241	226	305	384	256	267	472	399
1985	572	596	820	478	393	284	244	215	266	189	230	232	377
1986	306	498	613	337	321	214	188	329	195	192	266	948	367
1987	884	1098	643	431	785	902	435	319	351	368	349	452	585
1988	650	776	1017	630	590	630	337	261	227	386	398	487	532
1989	1332	1303	760	503	361	341	356	535	365	281	318	362	568
1990	1197	444	690	384	348	252	382	297	317	350	359	348	447
1991	635	1233	1398	1175	657	464	390	309	248	622	321	541	666
1992	402	433	584	454	430	251	238	218	321	414	652	625	419
1993	696	1073	675	491	267	481	271	279	537	474	312	339	500
1994	595	748	574	401	297	269	256	205	180	214	297	593	386
1995	789	2085	834	802	491	364	376	253	244	448	386	463	628
1996	1118	751	1269	505	364	300	265	254	457	491	446	620	570
1997	1353	1076	457	346	330	521	296	250	307	339	634	654	547
1998	518	982	921	532	533	350	284	280	354	565	275	749	529
1999	1454	1318	1007	489	381	427	322	230	284	231	212	338	558
2000	676	799	551	314	212	194	240	243	403	229	432	687	415
2001	621	919	564	356	313	241	236	212	218	461	318	634	424
2002	1050	962	724	361	369	259	242	268	235	182	401	481	461
2003	817	814	516	345	248	212	201	179	171	227	309	414	371
2004	618	796	524	426	343	406	380	207	174	317	382	503	423
MIN	127	196	214	172	100	135	92	94	91	117	126	190	138
MED	722	798	675	441	349	342	267	232	256	316	337	505	437
MAX	1454	2085	1398	1175	1004	2420	804	629	1023	873	785	1201	1238

Anexo B – Níveis de montante e jusante do reservatório de Barra Bonita (2001 a 2005)

Ano 2001	Níveis de Montante					
	Máxima			Mínima		
Mês	Cota	Dia	% Reserv.	Cota	Dia	% Reserv.
Janeiro	448,94	31	71,3	447,84	18	60,25
Fevereiro	449,74	28	79,8	448,94	1	71,3
Março	450,63	31	89,74	449,66	7	78,93
Abril	450,85	9	92,29	450,31	28	86,11
Maio	450,33	1	86,33	449,72	31	79,58
Junho	449,74	4	79,8	449,11	30	73,07
Julho	449,11	1	73,07	447,11	31	53,34
Agosto	447,11	1	53,34	446,08	20	44,14
Setembro	446,66	20	49,24	446,26	1	45,7
Outubro	448,40	25	65,78	446,43	1	47,19
Novembro	448,04	1	62,21	447,18	11	53,99
Dezembro	449,72	21	79,58	448,02	1	62,01

Ano 2001	Níveis de Jusante				Vertida	
	Máxima		Mínima		Máxima	Mínima
Mês	Cota	Dia	Cota	Dia	m3/s	m3/s
Janeiro	429,50	1	427,35	23	803	16
Fevereiro	429,40	14	427,35	27	630	36
Março	428,30	28	427,30	1	835	209
Abril	428,30	2	427,20	13	901	451
Maio	428,05	16	427,20	10	790	0
Junho	428,00	28	427,35	23	0	0
Julho	428,05	4	427,35	5	0	0
Agosto	427,95	1	427,20	13	0	0
Setembro	428,10	26	427,10	12	0	0
Outubro	428,05	3	427,25	1	159	0
Novembro	428,20	6	427,20	19	0	0
Dezembro	428,10	31	427,25	14	0	0

Ano 2002	Níveis de Montante					
	Máxima			Mínima		
Mês	Cota	Dia	% Reserv.	Cota	Dia	% Reserv.
Janeiro	450,09	13	83,65	449,39	7	76,03
Fevereiro	450,52	15	88,48	449,99	1	82,54
Março	451,07	27	94,86	450,43	10	87,46
Abril	451,40	30	98,79	450,82	3	91,94
Maio	451,50	6	100	451,16	31	95,93
Junho	451,16	1	95,93	449,86	30	81,11
Julho	449,86	1	81,11	449,44	22	76,57
Agosto	449,93	12	81,88	449,17	30	73,7
Setembro	449,17	1	73,7	448,66	23	68,42
Outubro	448,65	1	68,31	446,97	31	52,03
Novembro	447,61	5	58,04	446,66	10	49,24
Dezembro	448,27	29	64,48	447,02	1	52,51

Ano 2002	Níveis de Jusante				Vertida	
	Máxima		Mínima		Máxima	Mínima
Mês	Cota	Dia	Cota	Dia	m3/s	m3/s
Janeiro	430,30	15	427,40	7	1170	39
Fevereiro	429,80	11	427,35	2	1220	39
Março	429,40	27	427,30	1	631	20
Abril	428,10	1	427,40	16	486	408
Maio	428,00	23	427,30	18	423	42
Junho	428,10	3	427,30	11	336	0
Julho	428,05	4	427,30	10	471	0
Agosto	428,00	24	427,30	9	707	166
Setembro	427,95	9	427,25	23	641	282
Outubro	428,10	30	427,10	16	0	0
Novembro	428,15	30	427,20	8	0	0
Dezembro	428,10	4	427,25	13	0	0

Ano 2003	Níveis de Montante					
	Máxima			Mínima		
Mês	Cota	Dia	% Reserv.	Cota	Dia	% Reserv.
Janeiro	449,93	24	81,88	448,21	1	63,89
Fevereiro	450,43	19	87,46	449,8	1	80,46
Março	450,87	19	92,52	450,25	1	85,43
Abril	451,40	23	98,79	450,77	1	91,36
Maio	451,41	11	98,91	451,22	1	96,64
Junho	451,46	12	99,52	451,28	30	97,36
Julho	451,28	1	97,36	450,61	31	89,51
Agosto	450,61	1	89,51	449,67	31	79,04
Setembro	449,67	1	79,04	448,55	30	67,3
Outubro	448,55	1	67,3	447,35	31	55,58
Novembro	447,35	1	55,58	446,54	30	48,17
Dezembro	448,01	30	61,82	446,54	1	48,17

Ano 2003	Níveis de Jusante				Vertida	
	Máxima		Mínima		Máxima	Mínima
Mês	Cota	Dia	Cota	Dia	m3/s	m3/s
Janeiro	430,05	24	427,25	9	1020	17
Fevereiro	430,30	19	427,40	9	1220	20
Março	428,30	15	427,20	23	40	20
Abril	428,00	27	427,20	12	0	0
Maio	428,05	21	427,25	11	211	0
Junho	427,95	12	427,25	8	0	0
Julho	428,00	18	427,25	23	0	0
Agosto	428,05	12	427,35	8	0	0
Setembro	428,15	10	427,20	30	0	0
Outubro	428,20	4	427,20	17	263	132
Novembro	428,10	26	427,20	23	0	0
Dezembro	427,90	16	426,90	31	0	0

Ano 2004	Níveis de Montante					
	Máxima			Mínima		
Mês	Cota	Dia	% Reserv.	Cota	Dia	% Reserv.
Janeiro	449,98	31	82,43	447,98	1	61,52
Fevereiro	450,54	29	88,71	449,94	13	81,99
Março	450,81	21	91,82	450,24	31	85,32
Abril	451,01	26	82,76	449,93	6	81,88
Maio	451,32	31	97,83	450,88	19	92,64
Junho	451,39	7	98,67	451,20	11	96,4
Julho	451,42	10	99,03	450,79	31	91,59
Agosto	450,79	1	91,59	448,74	31	69,24
Setembro	448,74	1	69,24	447,70	30	58,9
Outubro	448,47	29	66,49	447,66	1	58,52
Novembro	448,45	1	66,29	447,25	1	54,64
Dezembro	448,38	31	65,58	447,25	1	54,64

Ano 2004	Níveis de Jusante				Vertida	
	Máxima		Mínima		Máxima	Mínima
Mês	Cota	Dia	Cota	Dia	m3/s	m3/s
Janeiro	428,20	31	426,80	2	78	0
Fevereiro	429,50	25	427,25	17	752	20
Março	428,15	9	427,15	13	418	139
Abril	428,00	1	427,15	27	0	0
Maio	428,00	25	427,20	11	0	0
Junho	428,10	4	427,25	10	0	0
Julho	428,15	29	427,30	1	452	248
Agosto	428,00	3	427,30	3	192	96
Setembro	427,85	25	427,15	25	152	29
Outubro	428,15	27	427,10	5	291	81
Novembro	428,15	4	427,25	8	0	0
Dezembro	428,20	9	427,20	16	58	29

Ano 2005	Níveis de Montante					
	Máxima			Mínima		
Mês	Cota	Dia	% Reserv.	Cota	Dia	% Reserv.
Janeiro	449,90	23	81,55	448,38	1	65,58
Fevereiro	450,01	28	82,76	449,75	2	79,91
Março	450,92	25	93,1	450,01	1	82,76
Abril	451,14	27	95,69	450,84	1	92,17
Maio	451,53	25	100,36	451,14	1	95,69
Junho	451,31	21	97,71	451,18	9	96,17
Julho	451,30	7	97,59	450,8	31	91,71
Agosto	450,80	1	91,71	450,29	30	85,88
Setembro	450,32	9	86,22	449,27	30	74,76
Outubro	449,27	1	74,76	448,47	22	66,49
Novembro	448,68	1	68,62	446,91	30	51,5
Dezembro	447,19	23	56,9	446,66	17	49,24

Ano 2005	Níveis de Jusante				Vertida	
	Máxima		Mínima		Máxima	Mínima
Mês	Cota	Dia	Cota	Dia	m3/s	m3/s
Janeiro	429,50	24	427,20	18	797	35
Fevereiro	429,10	1	427,30	24	590	38
Março	429,95	26	427,20	2	1260	82
Abril	427,95	5	427,20	3	82	41
Maio	430,40	25	427,25	2	1480	249
Junho	428,00	6	427,30	6	676	383
Julho	428,00	2	427,20	25	418	130
Agosto	428,00	24	427,25	4	270	270
Setembro	428,10	2	427,20	17	192	96
Outubro	428,20	28	427,20	2	0	0
Novembro	428,10	5	427,15	13	0	0
Dezembro	428,00	1	427,25	29	0	0

APÊNDICE

Apêndice A – Relatório de saída do modelo de otimização (cenário médio)

GAMS Rev 121 Windows NT/95/98 11:49:06 PAGE 207
Otimizacao do Reservatorio de Barra Bonita
E x e c u t i o n

---- 391 VARIABLE qdfl.L vazao defluente total

	bbo
1	185.000
2	231.000
3	667.610
4	857.650
5	714.810
6	808.410
7	368.430
8	323.650
9	302.360
10	230.360
11	184.000
12	155.000
13	202.000
14	284.000
15	1106.620
16	830.650
17	599.810
18	703.410
19	456.790
20	402.650
21	281.360
22	204.360
23	188.000
24	171.000
25	169.000
26	247.000
27	500.620
28	300.290
29	552.810
30	973.160
31	364.650
32	233.290
33	241.000
34	196.360
35	186.000
36	192.000
37	382.000
38	323.000
39	611.610
40	1122.650
41	732.810
42	389.050
43	192.430
44	137.290
45	179.000
46	173.000
47	148.000
48	139.000
49	172.000
50	234.000
51	389.610

391 VARIABLE qdfl.L vazao defluente total

	bbo
52	80.290
53	544.810
54	146.050
55	115.420
56	137.290
57	119.000
58	138.000
59	118.000
60	121.000

---- 391 VARIABLE qver.L vazao vertida

	bbo
1	0.000
2	0.000
3	335.610
4	325.850
5	0.000
6	105.210
7	0.000
8	74.650
9	54.360
10	45.360
11	0.000
12	0.000
13	0.000
14	0.000
15	774.620
16	298.850
17	0.000
18	0.210
19	49.790
20	153.650
21	33.360
22	19.360
23	0.000
24	0.000
25	0.000
26	0.000
27	168.620
28	0.000
29	0.000
30	269.960
31	0.000
32	0.000
33	0.000
34	11.360
35	0.000
36	0.000
37	0.000
38	0.000

GAMS Rev 121 Windows NT/95/98 11:49:06 PAGE 209
Otimizacao do Reservatorio de Barra Bonita
E x e c u t i o n

391 VARIABLE qver.L vazao vertida

	bbo
39	279.610
40	590.850
41	0.000
42	0.000
43	0.000
44	0.000
45	0.000
46	0.000
47	0.000
48	0.000
49	0.000
50	0.000
51	57.610
52	0.000
53	0.000
54	0.000
55	0.000
56	0.000
57	0.000
58	0.000
59	0.000
60	0.000

---- 391 VARIABLE qtur.L vazao turbinada

	bbo
1	185.000
2	231.000
3	332.000
4	531.800
5	714.810
6	703.200
7	368.430
8	249.000
9	248.000
10	185.000
11	184.000
12	155.000
13	202.000
14	284.000
15	332.000
16	531.800
17	599.810
18	703.200
19	407.000
20	249.000
21	248.000
22	185.000
23	188.000
24	171.000
25	169.000
26	247.000
27	332.000
28	300.290
29	552.810
30	703.200

31	364.650
32	233.290
33	241.000
34	185.000
35	186.000
36	192.000
37	382.000
38	323.000
39	332.000
40	531.800
41	732.810
42	389.050
43	192.430
44	137.290
45	179.000
46	173.000
47	148.000
48	139.000
49	172.000
50	234.000
51	332.000
52	80.290
53	544.810
54	146.050
55	115.420
56	137.290
57	119.000
58	138.000
59	118.000
60	121.000

GAMS Rev 121 Windows NT/95/98 11:49:06 PAGE 210
Otimizacao do Reservatorio de Barra Bonita
E x e c u t i o n

---- 391 VARIABLE armusi.L armazenamento da usina

	bbo
0	92.870
1	99.650
2	96.410
3	89.390
4	77.540
5	70.120
6	70.120
7	79.370
8	79.900
9	87.680
10	95.340
11	70.120
12	70.120
13	98.080
14	75.950
15	100.000
16	70.120
17	70.120
18	92.050
19	84.630
20	93.220
21	70.120
22	80.440
23	70.120
24	98.200
25	78.940

26 84.850
27 100.000
28 91.120
29 79.260
30 98.680
31 70.120
32 70.120
33 73.740
34 80.230
35 96.750
36 70.120
37 70.120
38 70.120
39 100.000
40 78.290
41 70.120
42 70.120

GAMS Rev 121 Windows NT/95/98 11:49:06 PAGE 211
Otimizacao do Reservatorio de Barra Bonita
E x e c u t i o n

391 VARIABLE armusi.L armazenamento da usina

bbo

43 79.800
44 79.470
45 89.510
46 70.120
47 90.200
48 70.120
49 99.650
50 100.000
51 83.180
52 97.600
53 70.120
54 70.120
55 70.120
56 70.120
57 70.120
58 72.180
59 86.090
60 92.870

---- 391 VARIABLE ener.L energia da usina

bbo

1 32.019
2 39.981
3 57.462
4 92.042
5 123.717
6 121.708
7 63.767
8 43.096
9 42.923
10 32.019
11 31.846
12 26.827
13 34.962
14 49.154

15	57.462
16	92.042
17	103.813
18	121.708
19	70.442
20	43.096
21	42.923
22	32.019
23	32.538
24	29.596
25	29.250
26	42.750
27	57.462
28	51.973
29	95.679
30	121.708
31	63.113
32	40.377

391 VARIABLE ener.L energia da usina

bbo

33	41.712
34	32.019
35	32.192
36	33.231
37	66.115
38	55.904
39	57.462
40	92.042
41	126.833
42	67.336
43	33.305
44	23.762
45	30.981
46	29.942
47	25.615
48	24.058
24	99.769
50	40.500
51	57.462
52	13.896
53	94.294
54	25.278
55	19.977
56	23.762
57	20.596
58	23.885
59	20.423
60	20.942

---- 391 VARIABLE qverm.L = 60.85 vazao media vertida
total

---- 391 VARIABLE vfim.L volume no final do intervalo

bbo

0	2382.543
1	2557.038
2	2473.668
3	2293.468
4	1989.643
5	1800.000
6	1800.000
7	2036.610
8	2051.005
9	2249.962
10	2446.581
11	1800.000
12	1800.000

GAMS Rev 121 Windows NT/95/98 11:49:06 PAGE 213
Otimizacao do Reservatorio de Barra Bonita
E x e c u t i o n

391 VARIABLE vfim.L volume no final do intervalo

bbo

13	2516.717
14	1948.404
15	2566.000
16	1800.000
17	1800.000
18	2363.222
19	2172.506
20	2392.884
21	1800.000
22	2064.375
23	1800.000
24	2519.572
25	2027.059
26	2178.207
27	2566.000
28	2340.212
29	2034.457
30	2533.389
31	1800.000
32	1800.000
33	1893.257
34	2060.862
35	2479.442
36	1800.000
37	1800.000
38	1800.000
39	2566.000
40	2010.422
41	1800.000
42	1800.000
43	2049.569
44	2040.267
45	2298.147
46	1800.000
47	2316.638
48	1800.000
49	2557.038
50	2566.00
51	2135.426
52	2505.793
53	1800.000
54	1800.000
55	1800.000

```
 56     1800.000
 57     1800.000
 58     1851.084
 59     2210.750
 60     2382.543

GAMS Rev 121  Windows NT/95/98                 11:49:06  PAGE    214
Otimizacao do Reservatorio de Barra Bonita
E x e c u t i o n


----    391 PARAMETER qqmin

bbo 80.290


----    391 MODEL     fase1.MODELSTAT     =       5.000


EXECUTION TIME       =       0.015 SECONDS    1.4 Mb      WIN200-121


**** FILE SUMMARY

INPUT      C:\MAIA\BARRA CENARIO MEDIO.GMS
OUTPUT     C:\WINDOWS\GAMSDIR\BARRA CENARIO MEDIO.LST
```

Apêndice B – Valores das variáveis de qualidade da água (estações seca e chuvosa)

Estação seca					
Pontos	**Temperatura (°C)**	**Condutividade (µS/cm)**	**pH**	**OD (mg/L)**	**Turbidez (UNT)**
1	19,88	338,00	5,42	7,01	9,90
2	20,97	336,00	4,17	6,97	8,80
3	19,09	298,00	5,53	7,09	12,80
4	19,53	309,00	5,79	7,15	8,90
5	19,90	307,00	6,47	7,20	7,60
6	19,63	222,00	8,16	7,39	9,50
7	19,63	241,00	8,41	7,44	8,60
8	19,84	225,00	8,90	7,58	9,30
9	20,35	227,00	10,73	7,84	11,90
10	20,10	206,00	9,28	7,57	11,20
11	20,84	207,00	9,80	7,78	13,60
12	19,95	255,00	6,27	7,23	9,20
13	20,13	257,00	7,29	7,31	24,90
14	19,13	510,00	6,50	7,29	6,50
15	19,09	506,00	7,48	7,36	5,10
16	19,25	474,00	9,12	7,44	4,60
17	18,97	501,00	6,08	7,31	3,00
18	19,59	499,00	6,22	7,26	3,30
19	19,33	509,00	6,16	7,22	7,00
20	19,25	512,00	2,27	7,19	4,00
21	19,35	503,00	3,16	7,21	3,50
22	19,47	489,00	4,54	7,29	3,10
23	20,12	470,00	7,90	7,53	3,70
24	20,26	364,00	6,95	7,34	7,00
25	20,17	275,00	5,73	7,15	15,80
26	20,06	273,00	4,79	7,06	4,50
27	21,35	275,00	9,59	7,48	6,30
28	21,20	250,00	11,74	8,82	15,00
29	20,83	275,00	8,36	7,39	9,70
30	20,75	244,00	10,52	8,48	30,80

Estação chuvosa					
Pontos	**Temperatura (°C)**	**Condutividade (µS/cm)**	**pH**	**OD (mg/L)**	**Turbidez (UNT)**
1	27,14	362,00	5,69	6,88	33,00
2	26,80	342,00	5,02	7,17	45,60
3	26,88	326,00	4,65	7,12	45,90
4	26,28	304,00	4,47	7,10	58,40
5	26,00	316,00	3,62	7,09	47,90
6	26,12	351,00	6,45	7,45	33,10
7	26,15	352,00	6,25	7,48	22,50
8	25,90	369,00	7,83	8,18	9,40
9	25,86	370,00	8,87	8,85	11,10
10	25,81	367,00	8,71	9,08	12,10
11	25,81	380,00	6,96	8,52	8,30
12	26,09	487,00	3,37	7,40	4,00
13	26,25	491,00	5,51	7,42	3,60
14	27,19	297,00	4,20	7,15	35,30
15	27,77	322,00	3,52	7,10	30,80
16	28,52	297,00	3,57	7,11	28,50
17	27,14	295,00	3,36	7,12	32,50
18	27,65	358,00	5,45	7,38	9,20
19	26,89	406,00	4,55	7,38	9,30
20	27,21	389,00	4,67	7,37	7,25
21	26,95	456,00	3,39	7,36	5,40
22	26,88	497,00	3,70	7,44	5,50
23	26,95	511,00	3,98	7,47	5,40
24	26,45	501,00	4,15	7,46	3,40
25	25,84	477,00	4,56	7,36	3,30
26	25,77	442,00	5,19	7,35	5,40
27	26,05	392,00	5,70	7,41	10,80
28	25,96	395,00	3,44	7,21	6,00
29	25,77	398,00	3,12	7,20	6,60
30	25,54	397,00	1,43	7,35	3,50