USP

Campus de São Carlos

ANÁLISE DO APROVEITAMENTO MÚLTIPLO DO RESERVATÓRIO DE BARRA BONITA - SP, ATRAVÉS DE APLICAÇÃO DE TÉCNICA DE PROGRAMAÇÃO LINEAR ASSOCIADA A MODELO DE REDE DE FLUXO

HUGO ROCHA DE OLIVEIRA

Orientador: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Hugo Rocha de Oliveira

ANÁLISE DO APROVEITAMENTO MÚLTIPLO DO RESERVATÓRIO DE BARRA BONITA - SP, ATRAVÉS DE APLICAÇÃO DE TÉCNICA DE PROGRAMAÇÃO LINEAR ASSOCIADA A MODELO DE REDE DE FLUXO.

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço 19 / 08 / 04

Ass.:

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100047311

ORIENTADOR: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

Biblioteca

São Carlos

2004

Class. TESE EESC
Cutt. 3984
Tombo T 196/04
Sysno 1392184

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

O48a

Oliveira, Hugo Rocha de
Análise do aproveitamento múltiplo do reservatório de Barra Bonita - SP, através de aplicação de técnica de programação linear associada a modelo de rede de fluxo / Hugo Rocha de Oliveira. -- São Carlos, 2004.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.
Área: Hidráulica e saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad.

1. Recursos hídricos - otimização. 2. Recursos hídricos - simulação. 3. Recursos hídricos - sistemas de suporte à decisão. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **HUGO ROCHA DE OLIVEIRA**

Dissertação defendida e julgada em 16-04-2004 perante a Comissão Julgadora:

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

Prof. Assoc. **RODRIGO DE MELO PORTO** — Aprovado
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Dr. **BRUNO RABELO VERSIANI** — Aprovado
(Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)

Profa. Tit. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico este trabalho aos meus pais, Marina e Geraldo Magela,
grandes companheiros e meus exemplos de vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, e acima de tudo meu grande amigo, Frederico Fábio Mauad.

Aos Professores Antenor Rodrigues Barbosa Jr., Gilberto Queiroz da Silva e Jorge Adílio Penna, da UFOP, Maria do Carmo Calijuri, da EESC - USP e Rubem Lalaina Porto, da EP - USP, pelo apoio e incentivo.

À AES Tietê, em nome de Edwaldo Lippe, Faustino Levorato e José Simionato, pela ajuda fundamental na aquisição das informações necessárias à realização deste trabalho.

À CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

Aos funcionários e colegas do Departamento de Hidráulica e Saneamento, em especial aos do Laboratório de Simulação Numérica.

Aos amigos Caco e Liliane, pelo companheirismo na execução de nossos trabalhos.

Ao padrinho Ronaldo, ao primo Zander e ao grande amigo Paulo Paiva, pelo enorme incentivo.

Aos amigos, Petrucio e Luiza, pelo auxílio e orientação.

Aos meus irmãos, cunhados e sobrinhos, pelo apoio e carinho.

À minha querida namorada, Amanda, pelo amor incondicional e pelo carinho e compreensão nas horas difíceis. Agradeço também à sua família, em especial à minha sogra Josete, pelo enorme apoio.

Aos meus queridos pais, por serem a razão desta simples conquista.

Quem conhece os outros é inteligente.
Quem conhece a si mesmo é iluminado.
Quem vence os outros é forte.
Quem vence a si mesmo é invencível.

Lao Tsé

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS viii
LISTA DE TABELAS xi
LISTA DE SÍMBOLOS xii
RESUMO xv
ABSTRACT xvi
1 - INTRODUÇÃO 1
2 - REVISÃO DE LITERATURA 5
2.1 - Sistemas de Suporte à Decisão 6
2.2 - Modelos de Simulação 9
2.3 - Modelos de Otimização 12
2.3.1 - Programação Linear 12
2.3.2 - Programação Não-Linear 15
2.3.3 - Programação Dinâmica 17
2.4 - Modelos de Rede de Fluxo 19
2.5 - As Metodologias Multiobjetivo 21
3 - DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO 24
3.1 - Generalidades 24
3.2 - A Bacia Hidrográfica do Reservatório de Barra Bonita 26
3.2.1 - A Bacia dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 27
3.2.2 - A Bacia do Sorocaba-Médio Tietê 30
3.3 - Características Físicas 33
3.4 - Situação Atual dos Recursos Hídricos da Região 36
4 - O RESERVATÓRIO DE BARRA BONITA 39
4.1 - Dados Climatológicos e Hidrológicos 43
4.1.1 - Clima e Pluviometria 43
4.1.2 - Evaporação no Reservatório 44
4.1.3 - Fluviometria 48
4.2 - Assoreamento 52
4.3 - Limnologia 53
4.4 - Usos Múltiplos na Região do Reservatório 55
4.4.1 - Usos Consuntivos 55
4.4.1.1 - Abastecimento Urbano e Industrial 55

4.4.1.2 - Irrigação 56
4.4.2 - Usos Não Consuntivos 57
4.4.2.1 - Geração de Energia Elétrica 57
4.4.2.2 - Navegação Fluvial 57
4.4.2.3 - Pesca 62
4.4.2.4 - Recreação e Turismo 63
4.4.2.5 - Controle de Enchentes 64
4.4.2.6 - Diluição e Transporte de Resíduos 65
4.4.2.7 - Vazão Ecológica 65
4.5 - A Usina Hidrelétrica de Barra Bonita 65
5 - METODOLOGIA 71
5.1 - Generalidades 71
5.2 - Otimização da Geração de Energia 71
5.2.1 - Descrição da Metodologia 72
5.2.2 - Descrição do Problema de Programação Linear 73
5.2.3 - Utilização do Solver do Excel para a Resolução do Problema 75
5.2.4 - Determinação dos Valores Finais do Problema 78
5.2.5 - Elaboração de Cartas de Decisão para a Operação da UHE 81
5.3 - Aplicação de Simulação Computacional 82
5.3.1 - Os Modelos de Rede de Fluxo 82
5.3.2 - O Modelo de Simulação ACQUANET 86
5.3.2.1 - Tipos de Simulação 88
5.3.2.1.1 - Simulação Contínua 88
5.3.2.1.2 - Planejamento Tático 88
5.3.3 - Descrição da Metodologia de Simulação 89
5.3.4 - Forma de Apresentação dos Resultados 101
5.3.4.1 - Resultados da Simulação Contínua 101
5.3.4.1.1 - Índices de Desempenho 103
5.3.4.1.1.1 - Confiabilidade 104
5.3.4.1.1.2 - Resiliência 104
5.3.4.1.1.3 - Vulnerabilidade 105
5.3.4.2 - Resultados do Planejamento Tático 106
5.3.4.2.1 - Resultados do Reservatório 107
5.3.4.2.2 - Resultados das Demandas 107

6 - RESULTADOS 109
6.1 - Otimização da Geração de Energia 109
6.1.1 - Cartas de Decisão para a UHE Barra Bonita 115
6.2 - Simulação Computacional dos Usos Múltiplos no Reservatório 118
6.2.1 - Simulação Contínua 118
6.2.2 - Planejamento Tático 128
7 - CONCLUSÕES 131
8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 134
ANEXOS 146

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - A Bacia Hidrográfica do Reservatório de Barra Bonita 27
FIGURA 02 - A Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 29
FIGURA 03 - A Bacia Hidrográfica do Sorocaba - Médio Tietê.....32
FIGURA 04 - Imagem do satélite LANDSAT 35
FIGURA 05 - Imagem do satélite LANDSAT com algumas cidades localizadas na região do reservatório 39
FIGURA 06 - Curva Cota x Área do Reservatório 41
FIGURA 07 - Curva Vazão Liberada x NA a jusante do Reservatório 42
FIGURA 08 - Precipitação média mensal entre 1970 e 2000 na região do reservatório 43
FIGURA 09 - Tela do RegDAEE, com a bacia de contribuição ao Reservatório de Barra Bonita circulada.....49
FIGURA 10 - Tela de cálculo do RegDAEE.....50
FIGURA 11 - Gráfico de $Q_{7,T}$ 51
FIGURA 12 - Gráfico da curva de permanência 52
FIGURA 13 - A Hidrovia Tietê-Paraná.....59
FIGURA 14 - Volume total, volumes meta e volumes reservados para amortecimento de cheias no reservatório 64
FIGURA 15 - Balanço hídrico no reservatório.....73
FIGURA 16 - Planilha elaborada para utilização do Solver 76
FIGURA 17 - Janela de entrada dos parâmetros do Solver.....77
FIGURA 18 - Janela de resposta do Solver.....78
FIGURA 19 - Resultados finais do problema de otimização 81
FIGURA 20 - Representação de um sistema como uma rede de fluxo 83
FIGURA 21 - Interface do ACQUANET 86
FIGURA 22 - Diagrama unifilar com imagem de fundo.....90
FIGURA 23 - Tela de entrada das definições gerais para Simulação Contínua91
FIGURA 24 - Inserção da série de vazões médias mensais.....91
FIGURA 25 - Entrada das características físicas do reservatório.....92
FIGURA 26 - Entrada dos dados de prioridade de armazenamento e volume meta do reservatório 93

FIGURA 27 - Entrada dos dados vazão natural e taxa de evaporação no reservatório 94
FIGURA 28 - Entrada dos valores de demandas ao longo do período simulado 96
FIGURA 29 - Entrada dos dados de prioridade de atendimento e dos nós de retorno 97
FIGURA 30 - Entrada dos limites mínimos e máximos em cada link 97
FIGURA 31 - Procedimento para a realização do cálculo do problema de simulação 98
FIGURA 32 - Mensagem exibida no final da simulação 99
FIGURA 33 - Tela de entrada das definições gerais para Planejamento Tático 100
FIGURA 34 - Tela de seleção dos resultados a serem visualisados 101
FIGURA 35 - Resultados da simulação em formato de planilha 102
FIGURA 36 - Resultados da simulação em formato de gráfico 102
FIGURA 37 - Definição de duração e déficit de volume no período de falha do sistema 105
FIGURA 38 - Seleção de resultados a serem visualizados no Planejamento Tático 107
FIGURA 39 - Variação do armazenamento no reservatório no ano de 1955.. 109
FIGURA 40 - Variação do armazenamento no reservatório no ano de 1935.. 110
FIGURA 41 - Variação do armazenamento no reservatório no ano de 1983.. 111
FIGURA 42 - Variação dos NAs 111
FIGURA 43 - Variação dos valores de vazões turbinadas 112
FIGURA 44 - Variação dos valores de vazões vertidas 113
FIGURA 45 - Variação dos valores de vazões liberadas pelo reservatório 114
FIGURA 46 - Variação dos valores de potência gerada pela UHE 115
FIGURA 47 - Carta de Decisão a Nível Mensal da UHE Barra Bonita 116
FIGURA 48 - Carta de Decisão a Nível Diário da UHE Barra Bonita 117
FIGURA 49 - Variação dos volumes no reservatório no cenário 1 118
FIGURA 50 - Variação dos volumes no reservatório no cenário 2 119
FIGURA 51 - Variação dos volumes no reservatório no cenário 3 119
FIGURA 52 - Variação das vazões fornecidas para a UHE no cenário 1 120
FIGURA 53 - Variação das vazões fornecidas para a UHE no cenário 2 120

FIGURA 54 - Variação das vazões fornecidas para a UHE no cenário 3 121
FIGURA 55 - Variação das vazões liberadas no cenário 1 122
FIGURA 56 - Variação das vazões liberadas no cenário 2 122
FIGURA 57 - Variação das vazões liberadas no cenário 3 123
FIGURA 58 - Variação das vazões fornecidas para a eclusa no cenário 1 124
FIGURA 59 - Variação das vazões fornecidas para a eclusa no cenário 2 124
FIGURA 60 - Variação das vazões fornecidas para a eclusa no cenário 3 125
FIGURA 61 - Índices de desempenho para o cenário 1 126
FIGURA 62 - Índices de desempenho para o cenário 2 126
FIGURA 63 - Índices de desempenho para o cenário 3 127
FIGURA 64 - Probabilidades de o reservatório atingir o volume útil no fim de cada mês 128
FIGURA 65 - Probabilidades de ocorrência de falhas em cada mês 129
FIGURA 66 - Probabilidades de ocorrência de falhas em 2 ou mais meses .. 130

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Redução da carga orgânica total biodegradável e o equivalente populacional na Bacia Hidrográfica do Reservatório de Barra Bonita.....37
TABELA 02 - Trechos de rios, em quilômetros, classificados conforme seus IQAs no ano de 1989.....38
TABELA 03 - Características do Reservatório de Barra Bonita.....40
TABELA 04 - Dados de entrada para o cálculo da evaporação (valores médios mensais).....47
TABELA 05 - Dados de entrada para o cálculo da evaporação.....47
TABELA 06 - Valores de Q7,T.....50
TABELA 07 - Valores da curva de permanência.....51
TABELA 08 - Características da Eclusa de Barra Bonita.....60
TABELA 09 - Número de eclusagens realizadas no período de 1997 a 2002.....61
TABELA 10 - Dimensões da barragem e dos vertedores.....67
TABELA 11 - Dados das unidades geradoras.....68
TABELA 12 - Características da subestação elevadora.....70
TABELA 13 - Volumes Característicos.....92
TABELA 14 - Metas de armazenamento no último ano no reservatório.....93
TÁBELA 15 - Demandas da eclusa, da manutenção da vazão ecológica e do dreno.....95
TABELA 16 - Demandas mensais da UHE.....95
TABELA 17 - Prioridades em cada cenário.....100

LISTA DE SÍMBOLOS

T = temperatura

Δ = variável auxiliar para o cálculo da evaporação através do Método de Penman

γ = parâmetro de Bowen ou constante psicrométrica

q_{ef} = radiação efetiva sobre a superfície

L = calor latente de evaporação

G = radiação incidente de onda curta

R_t = radiação no topo da atmosfera

p = proporção entre o número efetivo de horas de brilho solar e o máximo possível

a = albedo

σ = constante de Stefan-Boltzman

e_a = tensão parcial de vapor d'água

U = umidade relativa do ar

e_s = a tensão de vapor saturado

E_i = termo que fornece a evaporação nas condições isotérmicas

w_2 = velocidade do vento a 2 metros

E_0 = evaporação potencial

$Q_{7,10}$ = vazão mínima de 7 dias consecutivos com período de retorno de 10 anos

C, x_T, A e B = parâmetros tabelados no estudo de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo

$Q_{95\%}$ = vazão de 95% da curva de permanência

$\overline{Q}$ = vazão média plurianual

b e c = parâmetros tabelados de cálculo da $Q_{95\%}$

$\overline{P}$ = precipitação média anual

AD = área de drenagem

Q_{Ecl} = vazão média mensal consumida nas eclusagens

C_{Ecl} = comprimento da eclusa

L_{Ecl} = largura da eclusa

$D_{Máx}$ = desnível entre máximos normais

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

I = afluências no sistema

P = precipitação sobre o reservatório

Q_{afl} = vazões afluentes ao reservatório

O = defluências no sistema

Q_{turb} = vazão turbinada

Q_{vert} = vazão vertida

Q_{ecl} = vazão de eclusagens

E = evaporação

INF = infiltração

V_t = volume no início do período

V_{t+1} = volume no final do período

ΔV = diferença entre os volumes no final e no início do período

Δt = período ou intervalo de tempo

Pot = potência média gerada

$Prod_{esp}$ = Produtibilidade específica da UHE

NA_{mon} = nível d'água a montante da UHE

NA_{jus} = nível d'água a jusante da UHE

hp = perda de carga no sistema

Q_{tur} = vazão turbinada

η= rendimento global do sistema

Q_{ji} = vazão que transita do nó "i" ao nó "j"

C_{ji} = custo (prioridade) da unidade de vazão que transita entre os nós "i" e "j"

N = número total de nós da rede

I_{ji} = limite inferior da vazão no arco "ji"

S_{ji} = limite superior da vazão no arco "ji"

NT = número total de anos de simulação

NH = número de anos do horizonte de simulação

X_t e X_0 = variáveis de sistema no cálculo dos índices de desempenho

S = valores satisfatórios

F = valores não satisfatórios, ou falhas

Pr = probabilidade

C = confiabilidade

R = resiliência

V = vulnerabilidade

M = duração da variável de estudo no período de falha

s_j = déficit da variável de estudo no período de falha

M = período total da falha

s_j = valor da falha em cada intervalo de tempo

Y = vazão, no caso de demandas, ou volume-meta, no caso de reservatórios (utilizado no cálculo da vulnerabilidade)

RESUMO

O objeto deste trabalho é a analise do aproveitamento múltiplo do Reservatório de Barra Bonita, localizado na confluência entre os rios Piracicaba e Tietê, no estado de São Paulo e pertencente ao chamado Sistema Tietê-Paraná. Será realizada a otimização da operação do reservatório, através de programação linear, com o objetivo de aumentar a geração de energia elétrica, através da maximização da vazão turbinada. Em seguida, a partir dos resultados da otimização da geração de energia, serão utilizadas técnicas de simulação computacional, para se obter índices de desempenho conhecidos como confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, além de outros fornecidos pelo próprio modelo de simulação a ser utilizado. Estes índices auxiliam a avaliação da freqüência, magnitude e duração dos possíveis conflitos existentes. Serão analisados os possíveis conflitos entre a navegação, o armazenamento no reservatório, a geração de energia e a ocorrência de enchentes na cidade de Barra Bonita, localizada a jusante da barragem.

Palavras-chave: recursos hídricos; usos múltiplos; otimização; simulação; sistemas de suporte à decisão.

ABSTRACT

The aim of this study is to analyze the multiple use of the Barra Bonita Reservoir, which is located in the confluence of the Piracicaba River and the Tietê River, in the state of São Paulo, and belongs to the called Tietê-Paraná System. The reservoir operation will be optimized, through linear programming, aiming to increase the hydropower generation, by maximizing the water flow through turbines. In sequence, on the hydropower generation optimization results, computer simulation techniques will be used, in order to obtain performance rates as reliability, resilience and vulnerability, in addiction to other rates provided by the simulation model itself. These rates can assist to evaluate the frequency, the magnitude and the duration of possible conflicts that may occur. The navigation, the water storage in the reservoir, the hydropower generation and the occurrence of floods in Barra Bonita, a city located downstream the dam, will be analyzed.

Keywords: water resources, multiple purposes, optimization, simulation, decision support systems.

1 - INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos, apesar de renováveis, são finitos e se apresentam cada vez mais escassos. São objeto para usos consuntivos e competitivos. Dentre os possíveis conflitos existentes entre os diversos usos da água, deve-se destacar, entre outros, os seguintes:

- A competição entre os usos para abastecimento urbano e industrial, geração de energia e irrigação, das águas de um rio ou reservatório;
- A utilização de água dos rios e reservatórios como receptáculo de efluentes urbanos ou industriais, comprometendo o uso para pesca e recreação no local e outros usos a jusante, pelas perdas em quantidade e/ou qualidade;
- O barramento de cursos d'água para geração de energia, para irrigação e controle de cheias, provocando obstáculos à navegação e à circulação dos cardumes;
- A competição entre a geração de energia e o controle de cheias, no uso dos reservatórios;
- A possibilidade de alagamento de terras férteis produtivas.

Portanto, o conflito entre estes diversos usos da água deve ser gerenciado para que seja garantido o desenvolvimento sustentável, ou seja, deve-se atender as necessidades humanas do presente sem o comprometimento do atendimento das necessidades das gerações futuras.

Nas ultimas décadas, para a análise destes conflitos, surgiram ferramentas de apoio denominadas Sistemas de Suporte à Decisão, os SSDs. Isto foi possível graças ao desenvolvimento dos microcomputadores e à sua popularização. Caracterizado pela utilização de bancos de dados, os

SSDs utilizam técnicas matemáticas de simulação e/ou otimização e fornecem enorme facilidade no diálogo entre o usuário e o computador.

O Sistema Tietê-Paraná é um patrimônio natural e infra-estrutural caracterizado por um conjunto de barragens hidrelétricas e reservatórios, dentre eles o Reservatório de Barra Bonita, que sustentam o uso múltiplo das águas em mais de 200 municípios de cinco estados da União. Sua capacidade geradora de qualidade de vida e riqueza demanda, ainda hoje, soluções de natureza científica e tecnológica relacionadas aos usos setoriais da água. A complexidade das interações entre o aproveitamento racional dos recursos hídricos e o uso e ocupação do solo das margens dos reservatórios e margens dos rios que compõem este sistema tem suscitado intensos debates entre planejadores de políticas públicas e ambientalistas, preocupados com a viabilidade de projetos hidrelétricos, hidroviários, agroindustriais, turísticos, de saneamento, de abastecimento, de preservação ambiental e temas relacionados.

O Reservatório de Barra Bonita, formado pela junção dos Rios Piracicaba e Tietê, com uma área de cerca de 310 km², é o primeiro de uma série de seis grandes reservatórios localizados na Bacia do Médio Tietê, a qual tem uma área de 32.330 km² e possui uma população de 5 milhões de habitantes. Dista a 250 km da cidade de São Paulo.

A complexidade dos problemas da engenharia de recursos hídricos atingiu uma magnitude bastante significativa. Desta forma, um planejamento adequado para que se chegue a uma distribuição mais justa da água a seus usuários tornou-se extremamente necessário. Para isso, técnicas de simulação e otimização vêm sendo desenvolvidas e aplicadas em locais onde existem conflitos entre os diversos usos da água. Porém, sempre é recomendável lembrar que essas ferramentas devem ser utilizadas no auxílio à tomada de decisões, elas não tomam decisões por si próprias.

A garantia do uso da água pelas gerações futuras depende do gerenciamento e uso racional nos dias de hoje. Portanto, é necessário que os reservatórios de acumulação de água para fins múltiplos, como o Reservatório de Barra Bonita, recebam atenção especial, com estudos de operação e de análise de conflitos, que cresçam juntamente com os avanços das técnicas de análise de sistemas.

Há cerca de 3 décadas, a preocupação com o planejamento da operação de usinas hidrelétricas aumentou proporcionalmente com as demandas energéticas. Anteriormente, a modelagem da operação dos reservatórios de geração de energia não era tão importante como nos dias de hoje, pois estes eram construídos para uma ou duas finalidades e a capacidade instalada das UHEs atendia a demanda energética com folga.

Além da existência de conflitos entre os usos das águas dos reservatórios, a dificuldade física, financeira e ambiental da construção de novas usinas vem colaborando em muito no aumento da importância do planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. A busca de uma política ótima de operação destes sistemas pode garantir o atendimento da demanda energética, além de resultar em uma economia substancial.

O Reservatório de Barra Bonita é alvo de um grande número de estudos e pesquisas sobre suas características e comportamento, pois recebe as águas dos Rios Tietê e Piracicaba. Estes atravessam as Regiões Metropolitanas de São Paulo e Campinas, respectivamente, de onde recebem seus despejos domésticos e industriais. Desta forma, já foram conduzidos vários estudos sobre a qualidade da água do reservatório, mas se comparado ao número de estudos realizados sobre a quantidade de água até hoje, estes foram poucos.

Deve-se avaliar a disponibilidade hídrica do reservatório e de sua área de influência, pois se trata de uma região de fundamental estratégia para o desenvolvimento do estado de São Paulo, através da agricultura, navegação, geração de energia, turismo, entre outras atividades.

Desta forma, os objetivos desta pesquisa são os seguintes:

- Fornecer uma visão geral do histórico e do estado da arte dos sistemas de suporte à decisão, através de revisão bibliográfica;
- Descrever o local de estudo, levantando informações das características físicas, climáticas, hidrológicas e sócio-econômicas da região e da situação atual dos recursos hídricos da região, tanto em aspectos quantitativos, como em aspectos qualitativos;
- Realizar a otimização da geração de energia pela UHE Barra Bonita, através de técnicas de programação linear, com o objetivo da

maximização da vazão turbinada, obedecendo as restrições físicas impostas pelos outros usos das águas do reservatório;

- Realizar a simulação computacional do reservatório, a partir dos resultados da otimização da geração de energia, visando analisar o comportamento atual e futuro do mesmo. Serão obtidos índices de desempenho conhecidos como confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, além de outros fornecidos pelo próprio modelo de simulação a ser utilizado.
- Fornecer sugestões ou recomendações, para que os problemas passíveis de serem detectados sejam resolvidos.

2 - REVISÃO DE LITERATURA

Durante os últimos 40 anos, um dos mais importantes avanços feitos no campo da engenharia dos recursos hídricos foi o desenvolvimento e adoção de técnicas computacionais para projeto, planejamento e gerenciamento dos complexos sistemas desta área. A análise de sistemas de usos múltiplos da água pode envolver diversas variáveis de decisão e restrições, e quando estas necessitam serem determinadas, são utilizadas técnicas de pesquisa operacional (YEH, 1985).

Atualmente, os avanços na tecnologia da computação, aliados ao aumento de complexidade nos problemas de gerenciamento de recursos hídricos, têm estimulado a prática de modelos matemáticos e simuladores computacionais como ferramentas para auxiliar nas tomadas de decisão. A escolha do método depende das características do sistema que está sendo considerado, avaliação de dados e principalmente das restrições e objetivos especificados. As restrições típicas incluem equações de continuidade, capacidade de armazenamento mínimo e máximo, quantidade de água liberada, limitações técnicas de equipamentos e obrigações legais e institucionais.

Na década de 1960, o processamento de dados foi a principal aplicação de computadores no gerenciamento de recursos hídricos. Como exemplo, tem-se o processamento de dados hidrológicos. Mais tarde, com a complexidade dos problemas de armazenamento dos reservatórios e problemas hidráulicos, a técnica da computação começou a ser utilizada para solucionar e simular modelos hidrológicos para determinação de vazões superficiais e otimização de usinas hidrelétricas (VOTRUBA et al., 1988).

Atualmente, os sistemas de suporte à decisão são os métodos computacionais mais indicados para a gestão de recursos hídricos. Através

deles, pode-se interpretar resultados, gráficos ou outros meios para que sejam feitos um gerenciamento e um planejamento corretos. A maioria destes sistemas é auxiliada principalmente por gerenciadores de informação (como o sistema de informação geográfica); ferramentas analíticas (como os modelos matemáticos e rotinas estatísticas) e interfaces gráficas, que facilitam a interpretação dos dados para o usuário (ORLOB, 1992).

2.1 - Sistemas de Suporte à Decisão

O desequilíbrio entre oferta e demanda na área dos recursos hídricos, acentuado nos últimos anos, tem imposto ao engenheiro de recursos hídricos soluções cada vez mais elaboradas. O abastecimento de uma pequena comunidade através da implantação de uma obra específica de pequeno porte em um local remoto pode eventualmente receber um tratamento de engenharia simplificado. Entretanto, esse tipo de problema tende a ser de pequena freqüência e, à medida que a população e o país crescem, outros problemas de uso múltiplo da água, como transferência de água entre bacias hidrográficas, escassez de recursos de capital para implantação de obras novas e similares, deverão merecer atenção de engenheiros e pesquisadores da área. Em particular, a dificuldade de obtenção de recursos de capital para a construção de novas obras implicará a operação cada vez mais eficiente de sistemas existentes (BARTH, 1987).

Segundo ROBERTO e PORTO (2001), o problema de alocação da água torna-se extremamente complexo e para ajudar a resolvê-lo tem sido apresentados, principalmente nas últimas três décadas, um grande número de instrumentos que fazem parte de metodologias conhecidas pelos nomes de Pesquisa Operacional, Análise de Sistemas de Recursos Hídricos e mais recentemente Sistemas de Suporte a Decisões.

A tomada de decisões a respeito de sistemas de recursos hídricos deve considerar obrigatoriamente aspectos hidrológicos, ambientais, econômicos, políticos e sociais, mutáveis no tempo e associados a incertezas de difícil quantificação. A medida que as demandas de água crescem, acirram-se os conflitos e disputas pelo recurso e os sistemas de recursos hídricos tendem a se tornar maiores e mais complexos. As duas últimas décadas viram nascer e

prosperar uma metodologia de auxílio à tomada de decisões baseada na intensa utilização de bases de dados e modelos matemáticos e também na facilidade com que propicia o diálogo entre o usuário e o computador. Esta metodologia, genericamente conhecida por Sistemas de Suporte a Decisão (SSDs), vem sendo aplicada com sucesso a diversos campos da atividade humana em que o problema da decisão é muito complexo, como é o caso do gerenciamento e do planejamento de sistemas de recursos hídricos.

Desde o início, deve ficar claro que um SSD não deve ser construído para tomar decisões e sim para auxiliar o homem em sua missão de decidir (PORTO e AZEVEDO, 1997).

ANDREU et al. (1996) apresentaram o AQUATOOL, um SSD originalmente desenvolvido para o planejamento de decisões associadas a bacias hidrográficas complexas. Subseqüentemente, ele foi expandido para ser incorporado a módulos relativos a estágios operacionais na tomada de decisões. Várias linguagens de programação, como C++, Visual Basic e Fortran coexistem no mesmo sistema. O modelo possui módulo de simulação de bacias, de otimização, de águas subterrâneas e 2 módulos de análise de risco. As bacias de Segura e Tagus foram utilizadas como estudos de caso para a validação do modelo. O valor deste SSD é demonstrado pelo fato de várias agências de gerenciamento de bacias o utilizarem no gerenciamento dos recursos hídricos.

JAMIESON e FEDRA (1996) apresentaram o SSD denominado "WATERWARE". Este SSD é derivado do Eureka EU 487, um colaborativo programa de pesquisa que tem o objetivo de desenvolver um SSD compreensivo e fácil de ser usado, para ser aplicado no gerenciamento de bacias hidrográficas. Seu propósito é auxiliar governo e comitês de bacias na tomada de decisões, resultando em um eficiente gerenciamento dos recursos hídricos, tanto em termos de qualidade quanto de quantidade de água. Combinando o uso de sistemas de informação geográfica (SIG), tecnologia de banco de dados, técnicas de modelagem e procedimentos de otimização, o seu objetivo é garantir qualidade na tomada de decisões. O SSD foi aplicado nas bacias do Rio Tâmisa, na Inglaterra, e do Rio Lerma, no México. O Rio Tâmisa atende a uma população da ordem de 12 milhões de pessoas, incluído Londres e o Rio Lerma corta o lado oeste da região do platô central do México,

constituindo uma população de 8,5 milhões de pessoas, incluído Guadalajara. Ambas regiões possuem problemas de baixa disponibilidade hídrica e de crescimento das demandas nos últimos anos. Os objetivos em ambos os casos foi fornecer ferramentas analíticas para serem usadas pelas equipes das agências gerenciadoras. As bacias possuem seus próprios problemas, peculiares a cada uma delas, e características muito diferentes. Enquanto que o objetivo da aplicação do SSD na bacia do Rio Lerma se preocupa com o desperdício no sistema de abastecimento, no caso do Rio Tâmisa seria um ajuste no planejamento. Cada bacia possui suas necessidades particulares e prioridades, destacando-se o atendimento à irrigação, no caso do Rio Lerma, e a poluição das águas subterrâneas, no caso do Rio Tâmisa.

STAM et al. (1998) desenvolveram um SSD para o gerenciamento do reservatório do Lago Kariba, localizado na Africa, ao longo da fronteira entre Zâmbia e Zimbabwe, o 4º maior lago artificial do mundo. O SSD leva em conta características relevantes do reservatório e outros parâmetros, tais como o montante de energia elétrica gerada, o armazenamento no reservatório ao longo do ano e o montante de água liberada pelo reservatório. Melhor do que um simples valor numérico, o SSD oferece ao tomador de decisão uma análise flexível do problema, sugerindo as ações a serem tomadas. O sistema foi ilustrado através de exemplos de tomada de decisões por parte do pessoal técnico que atua na operação do reservatório. Nessa simulação, comparando os resultados com a performance histórica do lago, a eficiência do SSD foi indicada por um aumento de 22% na geração de energia e uma redução de 25% no número de meses onde no mínimo uma comporta estava aberta. Dado o potencial dos problemas na estrutura da barragem, a importância desses 2 resultados é enfatizada devido aos perigos associados às excessivas vibrações na mesma.

STAHL e ELLIOTT (1999) aplicaram o SSD "DROP" para analisar os conflitos no uso da água nas regiões de Essex e Suffolk, no Reino Unido, onde vivem 1,7 milhão de pessoas e chove aproximadamente 110 mm/ano. Foi demonstrada a necessidade de um novo planejamento no uso da água do local para evitar um aumento nos custos com a operação do sistema.

Estas metodologias de suporte à decisão abrigam duas grandes classes de técnicas genericamente conhecidas como descritivas e normativas que no

campo de recursos hídricos traduzem-se nas técnicas conhecidas por simulação e otimização, respectivamente.

2.2 - Modelos de Simulação

Do latim "simulare", simular é conotado como reproduzir ou imitar, da forma mais aproximada possível do real, certos aspectos de uma situação ou processo, como também elaborar, empregar ou explorar modelos computacionais para a reprodução, representação ou imitação de fenômeno, situação ou processo concretos. A simulação torna possível realizar experiências com modelos matemáticos em computadores. Esta técnica é muito utilizada na prática e, apesar de não ser otimizante, proporciona meios para o tratamento detalhado do comportamento de sistemas. A vantagem dos modelos de simulação reside no fato de permitirem uma representação detalhada do protótipo e desta maneira avaliar com maior precisão o comportamento do sistema projetado, além de prever a resposta quando algumas variáveis são modificadas.

Um modelo de simulação é construído para representar o comportamento essencial de um sistema de recursos hídricos. Estes modelos podem calcular o valor de uma função objetivo ou índices de performance solicitados pelo usuário e a não linearidade, seja da função objetivo, seja dos processos simulados geralmente não constitui grande problema. Modelos de simulação são fáceis de entender e, por esta razão são amplamente aceitos por altos níveis gerenciais, geralmente constituídos por não-especialistas e até mesmo por leigos. Por estas razões, esta classe de modelos é, com certeza, a mais amplamente utilizada na análise de sistemas de recursos hídricos.

Modelos de simulação são incapazes, entretanto, de encontrar os valores das variáveis de decisão que otimizem os critérios formulados pelo usuário, o que constitui o ponto fraco da técnica. O usuário que desejar encontrar valores "satisfatórios" das variáveis de decisão utilizando um modelo de simulação é obrigado a recorrer aos chamados métodos de força bruta que se baseiam no processamento repetitivo do modelo, de tal forma a exaurir a faixa de valores possíveis das variáveis de decisão. Mesmo assim não se pode

garantir que os valores ótimos tenham sido encontrados (ROBERTO e PORTO, 2001).

O mais antigo modelo de simulação, segundo YEH (1985), associado aos recursos hídricos, é o estudo feito pelos Engenheiros das Forças Armadas Americanas em 1953 que consistia em estudar a operação de seis reservatórios no Rio Missouri.

Dentre os modelos de simulação que surgiram na década de 70, destacam-se o HEC-3, desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (USA) em 1971 e os SIM I e II (EVANSON e MOSELY, 1970), modelo HEC-5 (Centro de Engenharia Hidrológica - USA, 1979), Modelo da Bacia do Rio Arkansas (COOMES, 1979), Modelo TVA (SHELTON, 1979), HYSSR ("Hydro System Seasonal Simulator") desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros da Divisão do Pacífico Norte (JONES, 1979).

O HEC-3 e o HEC-5 têm capacidades similares para simular o sistema em intervalos de tempo mensais. No entanto, o HEC-3 não tem a capacidade de determinar o volume de controle de vazões. A versão HEC-3 (1972) foi expandida e modificada até chegar ao HEC-5 (1979) onde o usuário especifica as regras de operação do seu sistema, entrando com dados de capacidade de armazenamento dos reservatórios, vazões de entrada mínimas e máximas.

Outro modelo bastante conhecido e utilizado é o SIMLYD-II (SIM I e II), semelhante ao HEC-5, com a sofisticação de utilização de um algoritmo otimizante para definir a política operacional para cada intervalo de tempo. O objetivo do algoritmo é a minimização dos custos operacionais.

BRANDAO e RODRIGUES (2000) utilizaram o modelo IRAS para simular séries históricas de vazões na parte Portuguesa do Rio Guadiana. A rápida e intensa modificação do regime natural do Rio Guadiana nas últimas décadas causou certa preocupação com a disponibilidade hídrica local, especialmente na região da fronteira entre Portugal e Espanha. O início da construção da barragem de Alqueva contribuiu ainda mais com esses problemas. Algumas dessas séries simuladas refletem a influencia das obras hidráulicas já instaladas, outras simularam as obras hidráulicas a serem instaladas. O plano hidrológico espanhol foi considerado como fronteira de montante. Analisado a evolução do estoque de água nos reservatórios simulados, concluiu-se que os estoques são suficientes para o atendimento das

demandas, exceto no reservatório de Pedrogão, onde o nível morto é alcançado em 2 meses. Nos outros 7 reservatórios simulados, o nível de armazenamento decresce até um nível preocupante, após o abastecimento das demandas. Em seguida, o nível volta a crescer a níveis satisfatórios, exceto nos reservatórios de Odeleite e Beliche, onde há variação no armazenamento, atingindo níveis não satisfatórios.

MAUAD (2000) analisou os problemas de uso múltiplo no Aproveitamento Hidrelétrico de Alqueva, em Portugal, através do modelo de simulação "IRAS", considerando que o sistema deveria fornecer água para os consumos urbano e industrial, para irrigação e geração de energia e para o reforço de abastecimento ao Algarve e ao sul da Espanha.

PEIXOTO (2002) também utilizou o modelo "IRAS" para analisar os conflitos entre os usos múltiplos na Bacia do Sapucaí, no norte de São Paulo. O modelo foi utilizado para a determinação de índices de satisfação do sistema para os diversos usos da água.

Segundo BARTH (1987), a grande aplicação dos modelos de simulação em recursos hídricos tem sido na área do dimensionamento e operação de reservatórios múltiplos. Notadamente, quando se deseja levar em conta a aleatoriedade das seqüências de vazões afluentes e eventuais correlações cruzadas entre postos em uma bacia, o enfoque mais utilizado na prática tem sido a simulação. Simulação, ao contrário da otimização, procura tão somente representar um sistema em seus aspectos importantes. Um modelo de simulação não determina, por exemplo, a política ótima de operação a ser seguida. A partir dessa determinação, o modelo permite a acompanhamento dos níveis dos reservatórios, a determinação do valor da função objetivo ao longo do tempo, etc. A vantagem dos modelos de simulação reside no fato de permitirem uma representação detalhada do protótipo e desta maneira avaliar com maior precisão o comportamento de um sistema projetado.

MAIA e VILELLA (2001) aplicaram o modelo de simulação em tempo real OPERRES na Bacia do Paraguaçu, no estado da Bahia, onde se localiza o reservatório de Pedra do Cavalo, responsável pelo abastecimento de 57% da Região Metropolitana de Salvador. O modelo fornece informações sobre a disponibilidade hídrica do sistema de múltiplos reservatórios, em função de restrições vinculadas aos volumes armazenados.

2.3 - Modelos de Otimização

Derivada do radical ótimo, do latim "optimu", otimização é palavra que tem como conceito o conjunto das técnicas algorítmicas e de programação usadas para buscar o valor ótimo de funções matemáticas. A tarefa da otimização é minimizar ou maximizar a função objetivo, que se pretende otimizar, encontrando soluções para as variáveis de decisão. A técnica da otimização é muito difundida na literatura para modelar sistemas de reservatórios.

Por restrições computacionais estes modelos são usualmente obrigados a simplificar o sistema físico tratado e costumam levar desvantagem em relação à precisão, flexibilidade e representatividade dos modelos de simulação (ROBERTO e PORTO, 2001).

MIZYED, LOFTIS e FONTANE (1992) aplicaram um modelo de otimização em um sistema de múltiplos reservatórios chamado "Sistema Mahaweli", no Sri Lanka. A finalidade era minimizar a deficiência na geração de energia elétrica e satisfazer a demanda para irrigação, que estava sendo mal atendida.

VEDULA e MUJUMDAR (1992) desenvolveram um modelo de otimização de operação de reservatórios para irrigação de culturas variáveis ao longo do ano. O volume do reservatório, a vazão afluente e a umidade do solo das áreas irrigadas foram tratados como variáveis. Foi feita uma aplicação ao Reservatório de Malaprabha, na Bacia Krishna, estado de Karnataka, India. O modelo foi aplicado em áreas de culturas já crescidas, tais como algodão, trigo, sorgo, milho, açafrão e outros. O maior mérito desse estudo foi a integração da tomada de decisões entre o operador do reservatório e os fazendeiros locais.

Por categoria, os métodos de otimização se dividem em: programação linear, programação não linear e programação dinâmica.

2.3.1 - Programação Linear

De acordo com BARBOSA (1997), o modelo de programação linear consiste na representação aproximada da realidade e um sistema, através de um conjunto de equações e inequações lineares, onde se procura alocar

eficientemente recursos limitados entre várias atividades competitivas, de tal forma que maximize ou minimize uma função linear chamada de função objetivo. Pode-se assegurar que a programação linear (PL) é a técnica mais conhecida e usada na solução de problemas de otimização. O desenvolvimento da PL está entre os mais importantes avanços científicos do século XX. O termo linear refere-se à necessidade de se haver relações lineares entre as variáveis. O termo programação não se associa à computação e sim ao planejamento de atividades.

Dentre as inúmeras aplicações da PL, podemos destacar o planejamento de atividades na agricultura e pecuária, na indústria de modo geral, nos setores financeiro, elétrico, de telecomunicações, entre outros.

Ainda segundo BARBOSA (1997), a PL foi estabelecida em termos matemáticos formais por Dantzig em 1947, para resolver problemas de logística da Força Aérea Americana. Na área de recursos hídricos, as primeiras aplicações aconteceram na década de 60, onde o "Harvard Water Resources Group" fez uma aplicação da PL a um problema de gerenciamento de água subterrânea. Desde então, a PL se caracteriza como a técnica de otimização mais empregada na área de recursos hídricos. As razões são a flexibilidade da técnica, a maior facilidade de entendimento, a capacidade de se tratar problemas de grande porte e a grande variedade e disponibilidade de pacotes computacionais. Em contrapartida, registra-se a limitação quanto a exigência da linearidade das funções, condição não atendida na maioria dos problemas em recursos hídricos.

MOHAN e RAIPURE (1992) desenvolveram um modelo de programação linear multiobjetivo para ser aplicado em um sistema de 5 reservatórios, denominado Sistema Chaliyar, localizado em Kerala, na Índia. Os objetivos do modelo são a maximização do fornecimento de água para irrigação e a maximização da produção de energia hidrelétrica, sujeitos às limitações físicas, às restrições ambientais e à garantia da continuidade do armazenamento. O modelo foi aplicado a 3 séries de vazões afluentes ao sistema de reservatórios, representando vazões mínimas, médias e máximas. A análise de conflitos entre os usos dá água para irrigação e geração de energia também foi realizada. Foi sugerida uma melhor política de gerenciamento do sistema, pois a meta geração de energia em uma das usinas só foi alcançada em 3 meses.

FRANCATO e BARBOSA (1996) apresentaram um trabalho contendo os resultados da operação de um sistema com horizonte de planejamento anual e intervalo de discretização mensal, obtidos através de um modelo capaz de considerar todo o horizonte no processo de otimização. A maioria dos modelos otimiza a operação intervalo por intervalo e o ótimo global é obtido através de uma relação de recorrência entre os intervalos, prejudicando todo o horizonte de planejamento. O modelo foi aplicado em um sistema que compreende as usinas hidrelétricas de Emborcação e Itumbiara, ambas pertencentes ao Rio Paranaíba.

FRANCATO e BARBOSA (1997) apresentaram um estudo dos diferentes fatores que influenciam diretamente nos resultados fornecidos pelos modelos de otimização, quem muitas vezes são de difícil compreensão e entendimento. Para esta análise, trabalhou-se com um sistema formado pelos reservatórios de Emborcação e Itumbiara, pertencentes ao Rio Paranaíba. O modelo de otimização utilizado faz uso de sucessivas iterações da programação linear, contemplando todo o horizonte de planejamento. Concluiu-se que nos casos onde as usinas de jusante da cascata têm maior produtibilidade, o sistema é mais eficiente, devido ao fato de que, mesmo com um menor volume de água passando pela usina de jusante, consegue-se atender à demanda energética. O modelo prioriza os turbinamentos em usinas de maior produtibilidade, justamente por apresentarem maior capacidade de converter água turbinada em energia elétrica.

FEIRING et al. (1998) aplicaram um modelo de programação estocástica em um sistema de fornecimento de água para irrigação e geração de energia. O ponto ótimo do sistema foi encontrado através da programação linear e a solução obtida através de decisões em múltiplos estágios. Essa aproximação permite que variáveis aleatórias sejam incorporadas no problema de programação linear.

MOUSAVI e RAMAMURTHY (2000) apresentaram duas técnicas potenciais para se otimizar sistemas de abastecimento de água grandes e complexos. Este modelo utiliza aplicações da teoria do controle ótimo e da programação linear de sucessivas penalidades. Foi feita uma comparação com um modelo existente de programação dinâmica que foi aplicado em um sistema de múltiplos reservatórios.

LOÁICIGA (2002) desenvolveu um modelo de otimização, através de programação linear, que quantifica o impacto da evaporação e das chuvas na capacidade ótima do reservatório e no desempenho do sistema. A aplicação foi na Bacia do Rio Santa Ynez, na região central da Califórnia, EUA. Existem muitos conflitos no uso da água nessa região, no que diz respeito ao abastecimento urbano, agrícola e à pesca. Este modelo foi particularmente idealizado para reservatórios que sofrem intenso impacto da evaporação e permite que sejam consideradas uma boa variedade de funções objetivo. Os resultados mostraram a necessidade de se tomar providências a respeito do estudo do impacto da evaporação sobre a capacidade do reservatório, que estava sendo mal estimado. A política de liberação deveria ser revista, para que o abastecimento das regiões não corra nenhum tipo de risco.

2.3.2 - Programação Não-Linear

Uma característica comum nos problemas de engenharia é a não linearidade observada nos modelos matemáticos utilizados para representar os processos físicos em questão. Neste contexto, a programação não linear (PNL) surgiu em 1951, a partir do trabalho pioneiro de KUNH e TUCKER[1].

A grande vantagem da PNL é sua enorme abrangência na solução de problemas e, elaborado o modelo a ser otimizado, nenhuma simplificação é necessária. Os maiores problemas se relacionam à incerteza, pois não há garantia de que a solução ótima foi encontrada.

SYLLA (1995) apresentou um modelo de auxílio no planejamento de operação de um sistema de 5 reservatórios localizados na Bacia do Rio Senegal, no Oeste da África, que têm o propósito de fornecer água para abastecimento, geração de energia e navegação. O modelo foi formulado através de programação não-linear determinística de grande escala, sendo as variáveis de decisão as vazões mensais liberadas pelos reservatórios e as vazões turbinadas. A busca da solução foi feita através do método das penalidades e o problema resultante com restrições lineares foi resolvido com grande eficiência através de técnicas de redução do gradiente, utilizando a estrutura especial da matriz complexa.

FRANCATO, et al. (2000) estudaram a operação otimizada de um sistema de geração hidrelétrica feita através da aplicação da técnica da programação não-linear. Tratou-se do problema de planejamento da operação de médio prazo, com horizonte de planejamento anual e intervalo de discretização mensal. O "solver" utilizado foi o GAMS/CONOPT, para programação não-linear. A modelagem foi feita sobre o sistema da Bacia do Rio Paranaíba, contemplando as usinas de Emborcação, Nova Ponte, Itumbiara, Cachoeira Dourada e São Simão, localizadas na região sudeste brasileira. A otimização foi feita de forma global, determinando as vazões a serem liberadas a cada mês e os conseqüentes armazenamentos. A função objetivo visa minimizar os vertimentos resultantes de qualquer política de liberação ao longo de todo o horizonte de planejamento. Os resultados revelaram a adequação da metodologia e a consistência da política operativa ótima sugerida pelo modelo.

BARBOSA et al. (2001) estudaram o comportamento da operação de um sistema de 3 reservatórios em paralelo, localizados na Bacia do Capibaribe, em Pernambuco, e sujeitos a usos múltiplos. Foi utilizado o modelo de otimização ORNAP (Optimal Reservoir Network Analysis Program), baseado em programação não-linear, que trabalha a nível mensal. A análise foi feita para um ano no qual foram adotados dados hidrológicos médios. O ORNAP foi utilizado acoplado a modelos de otimização de áreas irrigadas e usos de água para piscicultura, controle de cheias e abastecimento urbano. Os resultados obtidos indicaram que o ORNAP se mostrou bastante adequado e aplicável a esta classe de problemas. A otimização da captação para atender as vazões demandadas para o abastecimento pode incrementar a receita líquida gerada pela irrigação com a liberação da água para a cultura irrigada.

ANDRADE et al. (2001) também utilizaram o ORNAP para determinar a operação ótima de um sistema hídrico formado por 2 reservatórios em série e 3 perímetros de irrigação, localizados na Bacia do Capibaribe, em Pernambuco. A escala de tempo utilizada foi a mensal. O processo de otimização foi resolvido numericamente, através de programação não-linear, contemplando uma função objetivo para a maximização da receita líquida anual advinda da agricultura irrigada, avaliando-se também o retorno financeiro da piscicultura

---

[1] CIRILO, 1997.

extensiva nos reservatórios. Todos os requerimentos de ordem legal, sócio-econômicos e de sustentabilidade hídrica, além das restrições físicas e condições climáticas foram considerados no modelo. O ORNAP, em todos os experimentos, se mostrou eficaz, pois os resultados alcançados são um interessante subsídio para o processo decisório e também eficientes, razão de serem obtidos com baixos custos computacionais.

2.3.3 - Programação Dinâmica

Dentre as diversas técnicas de otimização existentes e possíveis de serem aplicadas na solução de problemas de recursos hídricos, a programação dinâmica (PD) é a mais apropriada quando o problema a ser resolvido é composto por múltiplos estágios. Um exemplo típico é a operação de um reservatório, onde o problema pode ser definido como a determinação da seqüência de armazenamentos a serem alocados no tempo. A PD se difere totalmente das demais técnicas de otimização, pois nela não existe um padrão de solução do problema. Desta forma, a técnica é freqüentemente mal compreendida pelos iniciantes no assunto (BRAGA, 1983).

ARCHIBALD et al. (2001) utilizaram a programação dinâmica para a determinação da política ótima de operação de hidrelétricas, no caso de reservatório único, estendendo até o caso de múltiplos reservatórios. O processo markoviano de decisão se mostrou um método bastante apropriado para a solução do problema. Várias aproximações foram usadas devido à complexidade de se resolver problemas de operação de múltiplos reservatórios.

MICHALLAND et al. (1997) desenvolveram um método de gerenciamento de reservatórios através do ponto de vista bi-objetivo, considerando o uso da água para irrigação e geração de energia. O modelo leva em conta as variáveis climáticas, porém só é possível medir o impacto dessas variáveis no gerenciamento global do reservatório. Determinou-se que os efeitos são maiores quando há uma combinação de condições climáticas secas e frias. Foi utilizada a programação dinâmica estocástica, com intervalo de tempo diário, considerando 50 valores anuais de dados históricos de vazão afluente ao reservatório e de custos de produção de eletricidade. Também

foram considerados os usos de água para irrigação, através das curvas de demanda ou de um modelo de interação do solo com o aqüífero, também construído através da programação dinâmica estocástica, que roda simultaneamente com o modelo de gerenciamento de reservatórios. O modelo produz curvas de troca de perdas de produção de energia contra, respectivamente, área irrigada, colheita obtida e benefícios agrícolas. O modelo foi aplicado no Reservatório de Bort, no Vale de Dordogne, na França. O modelo mostrou que em se liberando água para irrigação, pode-se obter vantagens econômicas, considerando certas restrições, relacionadas à área irrigada máxima e ao custo da água mínimo. Conseqüentemente, a idéia de uso da água de um reservatório com um único propósito pode ser mudada. Ao contrário de se obter uma única solução para o problema, foi obtida um grupo de soluções, dentre as quais os tomadores de decisão podem escolher uma troca entre irrigação e geração de energia, ou mesmo entrarem em negociação. Este estudo de caso mostrou uma eficiência econômica global é alcançada quando a irrigação é feita simultaneamente à geração de energia e é até maior do que quando se dá prioridade à hidroeletricidade. Esse trabalho prova que os métodos multiobjetivo de tomada de decisões são uma promissora ferramenta gerencial para sistemas hídricos.

DROUIN et al. (1996) analisaram o cálculo da política ótima para um modelo de tempo descontínuo de um reservatório único usado para geração de energia. O rendimento da produção de energia é representado através de uma função linear de várias variáveis. Foi utilizada a estrutura especial das políticas ótimas em conjunto com aproximações por atribuição de valores às variáveis das funções ótimas de retorno em cada estágio da programação dinâmica, para diminuir as tentativas em uma quantidade comparada aos valores normais de iterações. O problema foi modelado através do processo de decisão markoviano. O objetivo do modelo é o de maximizar a expectativa do rendimento total deduzido em um horizonte infinito. As aproximações utilizadas se concentraram em encontrar as fronteiras dos valores ótimos das funções, o que é facilmente calculável. Apesar disto não garantir que se chegue na política ótima ou aproximadamente ótima, os resultados empíricos demonstraram que as conseqüências destes desvios são pequenas. Embora o modelo seja desenvolvido para ser aplicado no contexto específico do controle de vazões

em reservatórios, ele pode ser estendido aos casos de problemas estocásticos unidimensionais, tais como o gerenciamento de produção ou de dinheiro, onde aproximações lineares similares das várias variáveis são utilizadas.

2.4 - Modelos de Rede de Fluxo

Existem também os modelos que misturam características dos modelos de simulação e otimização e são conhecidos como Modelos de Rede de Fluxo (MRF). Os MRFs representam sistemas de recursos hídricos por uma rede formada de nós e arcos. Os nós representam reservatórios, demandas, reversões, confluências, e outros pontos importantes de um sistema. Os arcos são os elos de ligação entre os nós e representam trechos de rios, adutoras, canais e outras estruturas semelhantes.

O MODSIM é um modelo de simulação e otimização em rede de fluxo, desenvolvido na "Colorado State University" (LABADIE, 1984). De acordo com AZEVEDO et al. (1998), a capacidade de combinar simulação e otimização é um dos pontos fortes do MODSIM em relação aos outros modelos, nos quais as soluções ótimas devem ser determinadas por tentativas e erros.

O MODSIM inclui a capacidade de otimizar a operação de sistemas mediante a utilização de um algoritmo de rede de fluxo chamado "out of kilter". Trata-se essencialmente de um algoritmo de programação linear desenvolvido para a solução de problemas de otimização de redes de fluxo. Os modelos com versões anteriores ao MODSIM baseados em redes de fluxo que utilizaram este algoritmo comprovaram sua eficácia quando aplicados com sucesso em sistemas complexos de bacias hidrográficas, como a Bacia de Poudre no Colorado (LABADIE et al., 1986).

O MODSIM P32 é uma versão atualizada do modelo MODSIM, com uma interface amigável desenvolvida na Escola Politécnica da USP, onde foi testado, documentado e é de domínio público. Este modelo foi utilizado por AZAMBUJA (2000) na Bacia do Rio Piracicaba.

PORTO et al. (2000) utilizaram o modelo MODSIM para o desenvolvimento de um SSD para gerenciar a operação dos grandes sistemas produtores da SABESP, tais como o Sistema Guarapiranga, o Sistema

Cantareira e o Sistema Alto Tietê, localizados na Região Metropolitana de São Paulo.

Outro SSD foi desenvolvido por AZEVEDO e PORTO (2000) com vistas à integração do gerenciamento da quantidade e qualidade da água na Bacia dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, no estado de São Paulo. Foi feita a integração dos modelos MODSIM, de quantidade de água, e Qual2E, de qualidade de águas superficiais. Foi demonstrado pelo estudo que "diluição não é solução" ou seja, que o aumento de descargas a jusante do Sistema Cantareira através da construção de barragens não será suficiente para resolver o problema da deterioração da qualidade da água na bacia, e que será necessário um aumento substancial no nível de tratamento de efluentes urbanos assim como manter elevados níveis de tratamento de efluentes industriais.

Também através do MODSIM, LISBOA et al. (2001) desenvolveram um SSD piloto aplicado nas bacias dos Rios Paraguaçu e Itapicuru, na Bahia, visando a integração, dentro de um ambiente GIS, de um modelo de rede de fluxo, no caso o MODSIM, 1 cadastro de usuários e 2 módulos de cálculo de demandas hídricas.

Após o desenvolvimento do MODSIM P32, surgiu o MODSIM LS e em seguida o ACQUANET, a denominação atual do modelo.

O MIKE BASIN é outro modelo de rede de fluxo que merece atenção. LIMA (2002) aplicou o modelo como ferramenta para a análise do conflito entre os usos múltiplos da água na bacia do Rio Atibaia, no estado de São Paulo. Foi analisado principalmente o impacto gerado no abastecimento da região pela reversão de enorme quantidade de água para o Sistema Cantareira.

Não existe até o momento metodologia generalizada para construção de SSDs que garantam "a priori" boas soluções. Fatores subjetivos podem entrar em cena com pesos significativos e precisam ser considerados com o devido cuidado ao lado de outros aspectos que podem ser tratados mais objetivamente. Uma das questões mais polêmicas em planejamento e gerenciamento de recursos hídricos é como escolher e formalizar os critérios que guiarão a escolha da melhor alternativa (PORTO e AZEVEDO, 1997).

2.5 - As Metodologias Multiobjetivo

Segundo MATZENAUER e JARDIM (2001), as metodologias tradicionais de pesquisa operacional têm considerado, em geral, que o problema a ser resolvido já está devidamente estruturado e, portanto, pronto para ser formulado matematicamente. Mas o que acontece realmente na prática é que os problemas nas organizações tornam-se cada vez mais complexos e, conseqüentemente, não são estruturados. Dentro desse contexto, uma nova forma de pensar surgiu dentro da própria pesquisa operacional que caracteriza-se, principalmente, por considerar os aspectos qualitativos nas decisões, procurando gerar métodos para o processo decisório. Dentro dessa nova abordagem, as metodologias multicritério surgem como uma alternativa versátil e promissora, com destaque para as metodologias MCDM (Multi Criteria Decision Make) e MCDA (Multi Criteria Decision Aid).

GATES et al. (1991) desenvolveram através de um contexto de análise multicritério, uma avaliação de alternativas possíveis para a melhora do atendimento da demanda de irrigação nas regiões do Rio Alamosa e do Sistema La Jara Creek, no Vale de Saint Louis, no centro-sul do Colorado, EUA. Medidas de objetivos de suficiência, eficiência, segurança e igualdade no atendimento foram usados para avaliar a performance do sistema em cada alternativa considerada. Foi utilizada a técnica MCDM como um meio de conseguir um "ranking" agregado de alternativas de modo que avalie o atendimento das demandas, custo relativo, satisfação social, satisfação política e institucional e impacto ambiental. As melhores alternativas identificadas são aquelas que envolvem redução da perda no transporte por canais, aumento na eficiência dos métodos de irrigação e um refinamento no esquema de captação de água. Concluiu-se que nenhuma das alternativas que envolviam aumento no suprimento de água ou redistribuição do estoque teve "rankings" altos. Portanto, o estudo sugere uma redução da demanda de água através de práticas de conservação da mesma.

ABU-TALEB e MARESCHAL (1995) apresentaram o método de análise multicriterial denominado PROMETHEE V para avaliar e selecionar possíveis fontes potenciais de água, alocando fundos para que o desenvolvimento dos projetos e programas em questão possa transcorrer da melhor forma possível.

Políticas importantes, como proteção ambiental, gerenciamento do abastecimento e da demanda de água e cooperação regional podem ser consideradas explicitamente, no uso do procedimento multicriterial. Foi feita uma aplicação no Oriente Médio, mais precisamente na Jordânia, que possui graves problemas relacionados a crises de fornecimento de água. Foi discutida a escolha de alternativas de investimentos que melhor atenderia os objetivos nacionais mais relevantes do ponto de vista do país. As mais favoráveis opções se mostraram serem as responsáveis por um aumento na eficiência e enfatizaram a prioridade no uso da água para abastecimento doméstico. O maior ranking de alternativas alcançado foi o que envolvia práticas de conservação e regulamentação do uso da água.

BELLA, A. et al. (1996) aplicaram 2 métodos de tomada de decisão multicriterial (MCDM), a programação COMPROMISE e o ELECTRE III, na análise dos conflitos de alocação de água na bacia do Rio Grande. Tal rio se localizada em uma região topográfica e geologicamente diversa, desde o Colorado até acima do "Big Bend". Déficits no abastecimento podem ocorrer devido ao aumento da demanda e à diminuição da disponibilidade. Os aumentos na população do local têm causado acréscimos no bombeamento de água subterrânea, o que pode indiretamente afetar a alocação de água superficial no futuro. O gerenciamento da água nesta bacia é complexo por causa da complexidade dos tratados internacionais e das leis locais, estaduais e federais. Esse alto grau de complexidade dificulta em muito a compreensão do problema pelo tomador de decisão, o que justifica a utilização destas metodologias multiobjetivo. Deve-se ressaltar ainda que o efeito estufa causa um enorme impacto na região, o que poderá causar sérias falhas no atendimento na próxima década. Os critérios utilizados para classificar as alternativas foram fatores ambientais, políticas de gerenciamento de águas subterrâneas e fatores biológicos. Os resultados numéricos foram analisados, comparados e interpretados. Embora os 2 métodos sejam conceitualmente diferentes, eles forneceram resultados bem próximos, ou seja, deve-se unir ações para se obter água de qualidade, proteger os interesses públicos, construir um reservatório para melhorar o controle de enchentes, assim como reduzir a quantidade de sedimentos através da estabilização do reservatório.

LAHDELMA et al. (1998) propuseram uma técnica multicriterial de suporte à decisão denominado SMAA (Stochastic Multiobjective Acceptabily Analysis), para ser usado em ambientes de vários tomadores de decisão, baseado no uso de atribuição de pesos. O método produz para cada alternativa um índice de aceitabilidade, que mede a variedade das diferentes avaliações de cada uma dessas alternativas, um vetor de peso central, que representa os valores típicos resultantes da decisão e um fator de segurança, que verifica se os dados de entrada são suficientemente precisos para a tomada de tal decisão. Foi mostrado, como exemplo, uma aplicação a um gerenciamento de critérios e alternativas de um plano de administração municipal na Finlândia. A mais importante conclusão foi a de que os tomadores de decisão aceitaram unanimemente a forma da função de utilidade usada. A forma e a escala das funções de utilidade podem afetar os valores resultantes de aceitabilidade.

3 - DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

3.1 - Generalidades

O Reservatório de Barra Bonita foi construído em 1963, fazendo parte do complexo de usinas localizadas no Rio Tietê, com a finalidade de geração de energia hidrelétrica, mas atualmente é também bastante utilizado para fins de navegação, piscicultura e recreação e turismo. A seguir, temos algumas imagens da construção da barragem[2]. (Fotos 01, 02 e 03)

FOTO 01 - Ensecadeira e construção da barragem

[2] Cedidas pela AES Tietê

FOTO 02 - Construção da barragem

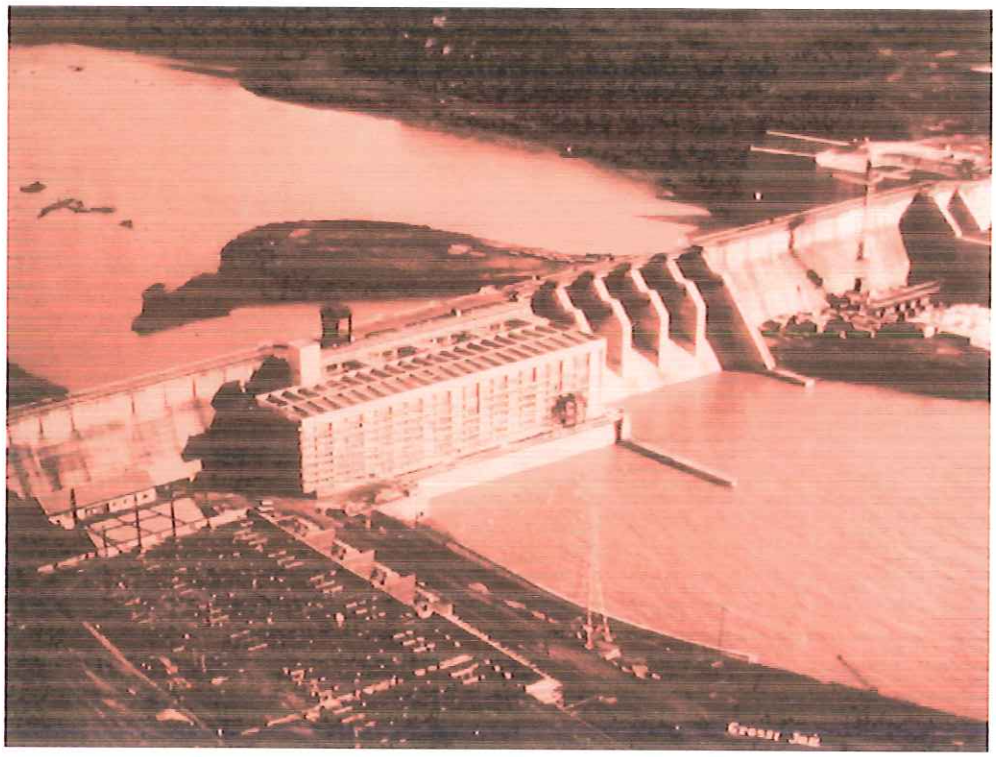


FOTO 03 - Enchimento do reservatório

Nos últimos anos, com a implementação da Hidrovia Tietê-Paraná, sua utilização para a navegação ganhou enorme importância, pois está próximo ao

início do trecho navegável do Rio Tietê, que começa na cidade de Conchas, em São Paulo.

A Eclusa de Barra Bonita (foto 04) é a primeira da Hidrovia Tietê-Paraná, através da qual é feita a transposição do desnível de cerca de 24 metros entre a vazante do Rio Tietê e a bacia de acumulação da hidrelétrica.

FOTO 04 - Vista da barragem com a eclusa ao fundo

3.2 - A Bacia Hidrográfica do Reservatório de Barra Bonita

O reservatório está localizado na Bacia do Médio Tietê Superior, que totaliza uma área de 32.330 km^2. Esta bacia é atravessada pelo Rio Tietê, na direção sudeste-noroeste, em toda sua extensão, sendo que seus principais afluentes à margem direita são os Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí e à margem esquerda, os Rios Sorocaba, Conchas e Peixes. A população nesta bacia atinge 5 milhões de habitantes, cerca de 16% do total no estado.

A imensa rede hidrográfica desta bacia pode ser dividida em 10 sub-bacias, que possuem o nome de seu rio mais importante: Atibaia, Camanducaia, Capivari, Corumbataí, Jaguari, Jundiaí, Médio Tietê Superior Alto, Médio Tietê Superior Baixo, Piracicaba e Sorocaba. Estas sub-bacias são

agrupadas em 2 bacias independentes dentro da Bacia do Médio Tietê Superior, em torno dos Rios Piracicaba e Tietê, denominadas Bacia dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí e Bacia do Sorocaba / Médio Tietê. A localização da bacia no estado de São Paulo pode ser vista na figura 01:

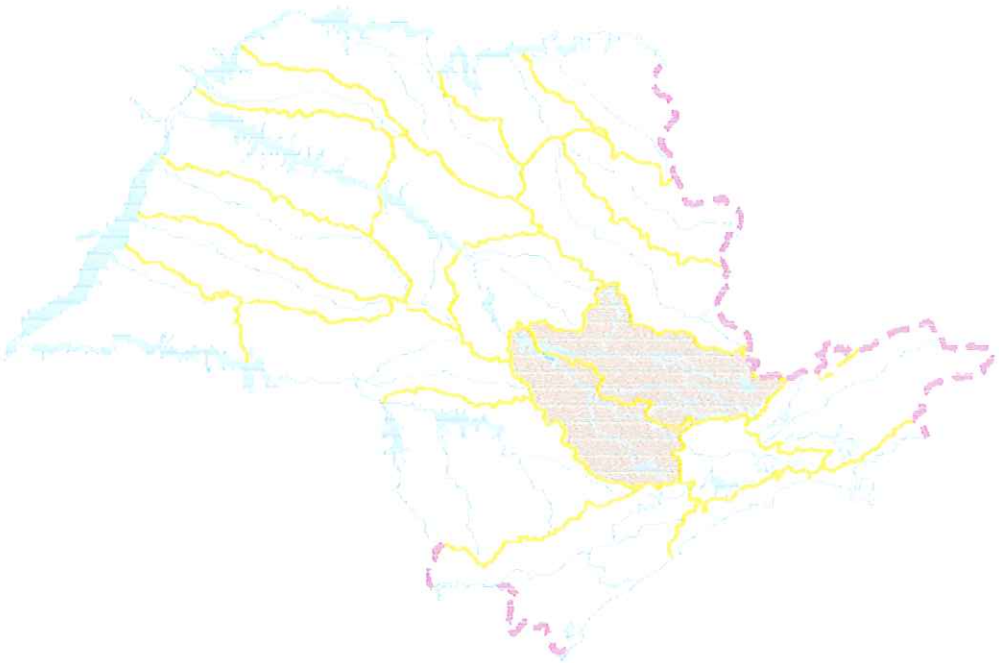


FIGURA 01 - A Bacia Hidrográfica do Reservatório de Barra Bonita
Fonte: Adaptado de COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ (1999).

3.2.1 - A Bacia dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí

Abrange desde a divisa com o Estado de Minas Gerais até o Reservatório de Barra Bonita, no Rio Tietê (figura 02). A foz do Rio Piracicaba está inundada por parte do reservatório. Esta bacia, que engloba três afluentes do médio Tietê, tem área de 14.044 km^2 no estado de São Paulo. Deste total, 11.314 km^2 são da Bacia do Rio Piracicaba, que nasce na serra da Mantiqueira, no Estado de Minas Gerais, e tem extensão da ordem de 370 km, desde suas cabeceiras até a foz, no rio Tietê. A área da Bacia do Rio Capivari é de 1.612 km^2, sendo que o rio possui de 180 km de comprimento, desde as suas nascentes na serra do Jardim. Já a Bacia do Rio Jundiaí tem área de

1.118 km^2, sendo que o rio nasce na serra da Pedra Vermelha, município de Mairiporã, e tem uma extensão aproximada de 110 km. As principais cidades localizadas na bacia são: Campinas, Piracicaba, Jundiaí, Limeira, Americana, Sumaré, Santa Bárbara d'Oeste e Rio Claro (COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ, 1999).

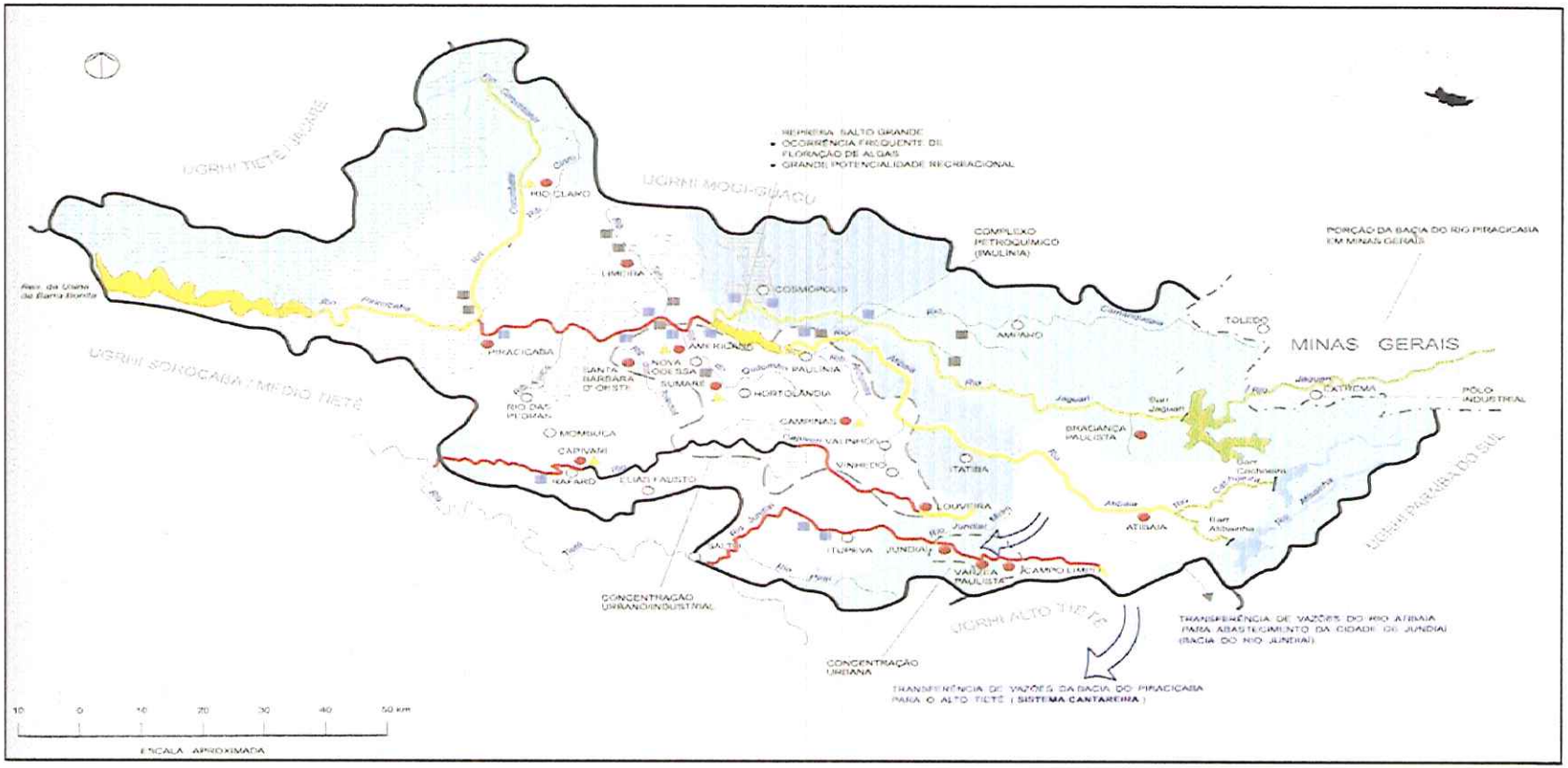


FIGURA 02 - A Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí

Fonte: http://www.sigrh.sp.gov.br (2003)

Na Bacia do Rio Piracicaba, os principais usos do solo rural são as pastagens (57% da área da bacia), agricultura (cana-de-açúcar, café, citrus e milho), além de hortifruticultura. Ocorrem áreas urbanas densamente ocupadas, com importante parque industrial. Esta bacia abrange a Área de Proteção Ambiental de Piracicaba. Nesta área, existem várias indústrias, tais como as de papel e celulose, alimentícias, do ramo sucro-alcooleiro, têxteis, curtumes, metalúrgicas, químicas e uma refinaria de petróleo[3]. Segundo dados da Fundação Seade[4], a área desta bacia, ocupada por vegetação nativa é de 116.407 ha, cerca de 10,3% da área total da bacia.

Na Bacia do Rio Capivari, os principais usos do solo são cana-de-açúcar, que ocupa 40% da área total, seguido por áreas cobertas por pastagens, culturas de milho, café e feijão, reflorestamento e atividades hortifrutigranjeiras, usos urbano e industrial, além de mineração (extração de areia). Nesta bacia encontram-se ainda áreas definidas, por decreto estadual, como Áreas de Proteção Ambiental de Jundiaí e Tietê. As principais atividades industriais referem-se aos ramos sucro-alcooleiro, curtumes, indústrias químicas, metalúrgicas, têxteis e alimentícias[5].

A Bacia do Rio Jundiaí possui 38,5% da área ocupada com pastagens naturais e cultivadas, 10% com áreas de reflorestamento e 9% com matas e capoeiras. Apresenta atividades agrícolas com o predomínio de frutas, citrus, hortaliças, tomate, batata, atividade granjeira, uso urbano e acentuado desenvolvimento industrial. Esta bacia abrange as áreas declaradas por decretos estaduais como Áreas de Proteção Ambiental de Jundiaí, Cabreúva e Várzea Paulista. As principais atividades industriais são alimentícias, metalúrgicas, químicas, têxteis, e de papelão (CETESB, 2003).

3.2.2 - A Bacia do Sorocaba-Médio Tietê

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

---

[3] http://www.cetesb.gov.br (2003)
[4] http://www.seade.gov.br (2003)
[5] http://www.cetesb.gov.br (2003)

(figura 03). O principal afluente incluído nesta sub-bacia é o Rio Sorocaba, na margem esquerda. A Bacia do Piracicaba, Capivari e Jundiaí é afluente na margem direita. As principais cidades desta bacia são Sorocaba, Botucatu, Itu, Tatuí, Tietê, Salto, São Roque, Porto Feliz, Piedade, Laranjal Paulista, Mairinque, Cerquilho, Votorantim, entre outras (COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO SOROCABA-MÉDIO TIETÊ, 1999).

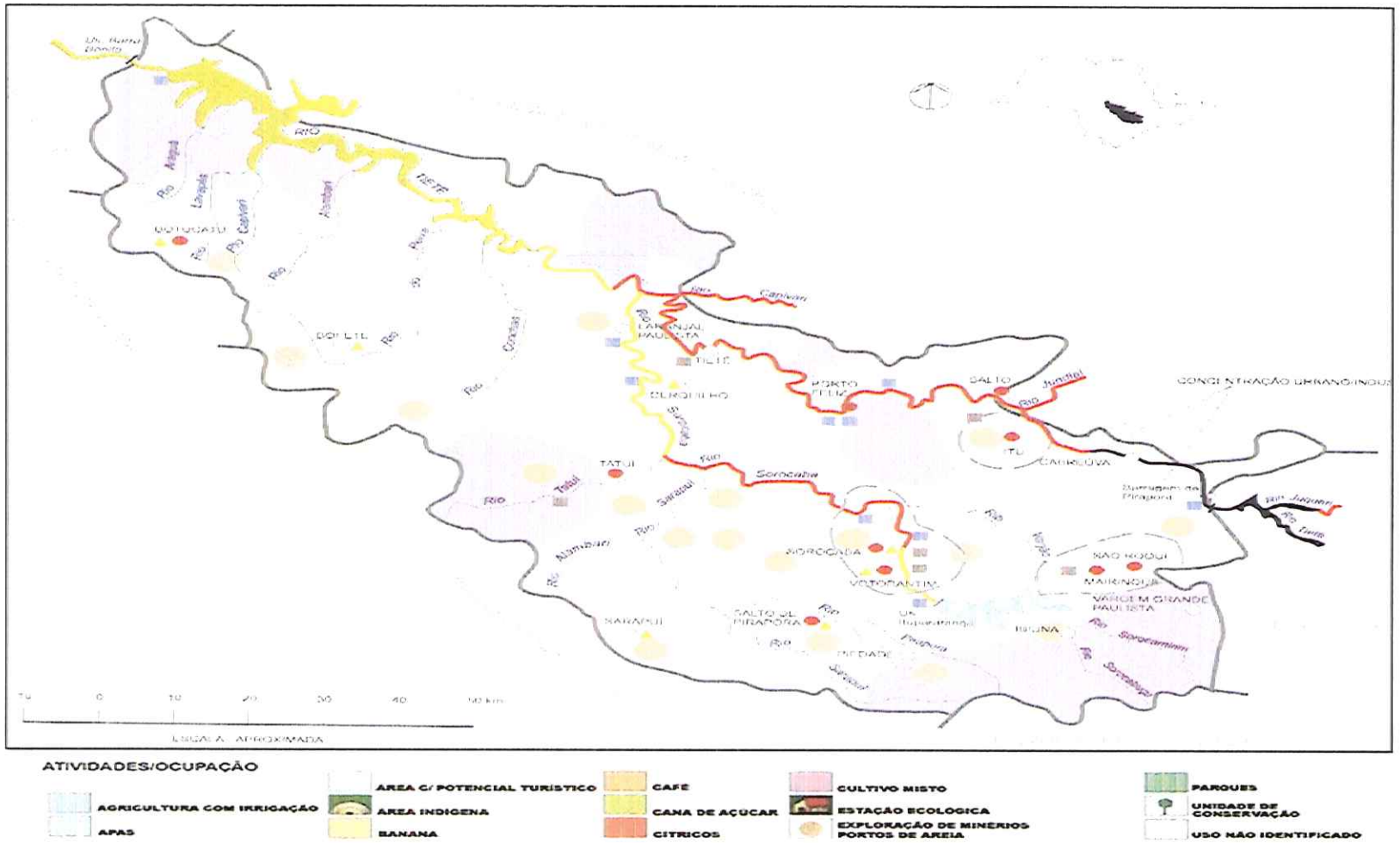


FIGURA 03 - A Bacia Hidrográfica do Sorocaba-Médio Tietê

Fonte: http://www.sigrh.sp.gov.br (2003)

A Bacia do Rio Sorocaba, com área de drenagem de 5.020 km², é constituída pelos Rios Sorocaba, Pirajibu, Ipanema, Tatuí e Sarapuí. O Rio Sorocaba, além de representar um manancial ainda com boa qualidade em sua maior parte, possui, principalmente na margem direita, grande porção contínua de vegetação, importante para o refúgio de fauna. Ocorre intensa atividade de mineração de areia na região, o que pode acarretar no assoreamento dos cursos d'água, principalmente nas cabeceiras da represa de Itupararanga. O uso do solo pode ser dividido entre mata natural (25%), cerrados e cerradões (4,5%), reflorestamento (7,5%), pastagens (32,5%) e policultura (o milho e a cana-de-açúcar) e extração mineral, além do uso urbano e industrial. As atividades industriais poluidoras são têxteis, alimentícias, metalúrgicas, mecânicas, químicas, engenhos e curtumes[6].

A Bacia do Rio Tietê Médio / Superior, com área de drenagem de 7. 079 km², abrange o Rio Tietê, desde a saída do Reservatório de Pirapora até a barragem de Barra Bonita, numa extensão de aproximadamente 270 km. O Uso do solo se divide entre os típicos de áreas urbanas e as atividades rurais (22% com plantações de cana de açúcar, café, citrus, hortaliças e frutas; 31% com pastagens cultivadas e 22% com pastagens naturais; 25% com matas, capoeiras, reflorestamento e atividades granjeiras). Insere-se na bacia a Área de Proteção Ambiental de Corumbataí - Perímetro Corumbataí, Tietê, Jundiaí e Cabreúva. As atividades industriais poluentes são têxteis, alimentícias, de papel e papelão, abatedouros, engenhos e usina de açúcar e álcool. A água dos rios é utilizada para abastecimento público, afastamento de efluentes domésticos, abastecimento industrial e lançamentos de efluentes industriais[7].

3.3 - Características Físicas

A área da Bacia do Médio Tietê engloba uma série de rochas do embasamento cristalino, a sudeste. Essas rochas, graníticas e metamórficas, são dos complexos Paraíba do Sul e Amparo e do grupo São Roque. A área restante da bacia desenvolve-se sobre rochas sedimentares e depósitos

---

[6] http://www.cetesb.gov.br (2003)
[7] http://www.cetesb.gov.br (2003)

vulcânicos da Bacia do Paraná, que é caracterizada pelos grupos Tubarão, Passa Quatro, São Bento e Bauru.

Nesta bacia, a sedimentação ocorreu em um ambiente pouco perturbado por fenômenos tectônicos e, em conseqüência disso, as unidades litoestratigráficas apresentam grande continuidade lateral, com pequenas variações faciológicas e geralmente são subparalelas às linhas do tempo. Aproximadamente, o eixo principal da deposição foi sempre orientado para a direção norte-sul.

Ocorrem três grandes compartimentos geomorfológicos nesta bacia, o Planalto Atlântico, a Depressão Periférica e as Cuestas Basálticas.

O Planalto Atlântico, a leste, é caracterizado pelo embasamento cristalino, possuindo um relevo movimentado, com amplitude média e enconstas convexas e retilíneas, com drenagem de alta densidade. Ao norte desta unidade, está a Serraria de São Roque, que recobre toda a área desde Sorocaba, até Atibaia, passando ainda por Jundiaí.

A Depressão Periférica, com sedimentos finos, domina toda a região central da área. A rede de drenagem é bem organizada, com destaque para os Rios Tietê, Piracicaba e Sorocaba. Os relevos predominantes nesta área são colinas amplas e médias, morrotes alongados e espigões, englobando municípios das regiões de Sorocaba, Campinas, Piracicaba, Conchas, Tatuí e de Rio Claro até São Pedro.

As Cuestas Basálticas estão restritas a uma faixa muito estreita a oeste, acima da Serra de Botucatu. O sistema de drenagem existente na área é diversificado, com vários rios procedentes da Depressão Periférica e do Planalto Atlântico. Na região frontal das Cuestas, predominam relevos de morros amplos, outros arredondados e mesas basálticas. No reverso, predominam morros amplos. As Cuestas aparecem nas regiões de Botucatu, São Manuel, Barra Bonita e São Pedro.

Na região onde se localiza o reservatório, há o afloramento de várias formações pertencentes à Bacia Sedimentar do Rio Paraná e, mais próximo à barragem, há o afloramento de rochas vulcânicas dispostas em derrames basálticos de composição toleítica pertencente à formação Serra Geral. À montante do reservatório, predominam rochas pertencentes à formação Botucatu (arenitos de granulação fina e média, originados do quartzo),

Pirambóia (arenitos finos e médios, com lâminas ricas em argilas e siltes), Corumbataí (argilitos, folhetos e siltitos, com intercalações de bancos carbonáticos, silexitos e camadas de arenitos finos) e rochas do Grupo Tubarão (corpos arenosos intercalados em camadas de lamitos, ritmitos e siltitos).

O tipo de rocha predominante na região é o basalto, sendo que a bacia de drenagem de Barra Bonita é predominantemente constituída por latossolo roxo eutrófico (LRe) e distrófico (LRd), de textura argilosa, aparecendo em alguns pontos, brunizem avermelhado (Bv), de textura argilosa.

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 jusante. (CALIJURI e TUNDISI, 1990).

Algumas características geomorfológicas e de uso e ocupação do solo na bacia podem ser vistos na figura 04:

FIGURA 04 - Imagem do satélite LANDSAT

Fonte: http://www.cdbrasil.cnpm.embrapa.br (2003)

No Reservatório de Barra Bonita, ocorre a extração de areia para construção civil e argila. Quase toda a área inundada pelo reservatório é atingida por esta atividade, sendo difícil a determinação dos volumes de material extraído e sua localização precisa. Esta extração é feita por meio de dragagem do leito do rio e bombeamento do material para tanques colocados nas margens.

3.4 - Situação Atual dos Recursos Hídricos da Região

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 de seus recursos hídricos.

Por definição, a DBO é a quantidade de oxigênio utilizada por uma população mista de microorganismos durante a oxidação aeróbia da matéria orgânica contida em uma amostra de esgotos à temperatura de 20 °C. Usualmente a DBO é dada em mg/L, ou seja, o número de miligramas indica a quantidade necessária de oxigênio para que bioquimicamente seja estabilizada a matéria orgânica presente em um litro de esgoto. A evolução da DBO potencial é um indicador da ampliação das atividades econômicas e urbanas na Bacia Hidrográfica do Reservatório de Barra Bonita. Destacam-se as indústrias de açúcar e álcool, química e petroquímicas, papel e celulose e alimentícias, como grandes fontes poluidoras. Os esgotos urbanos, juntamente com os efluentes industriais, constituem os principais focos de poluição orgânica da bacia.

A tabela 01 apresenta as cargas orgânicas e os equivalentes populacionais na bacia hidrográfica do reservatório.

TABELA 01 - Redução da carga orgânica total biodegradável e o equivalente populacional na Bacia Hidrográfica do Reservatório de Barra Bonita

Bacia	Carga Potencial		Carga Residual		Redução (%)
	tDBO/dia	População equivalente x 1000	tDBO/dia	População equivalente x 1000	
Capivari	364,6	6.751.200	30,8	569.900	92
Jundiaí	177,7	3.289.800	146,5	2.712.400	18
Piracicaba	1671,0	30.943.700	172,1	3.187.100	90
Sorocaba	193,4	3.581.600	35,1	650.500	82
Tietê Baixo	685,5	12.695.400	26,4	489.500	96
Tietê Médio-Inferior	1871,5	34.657.200	88,8	1.645.300	95
Tietê Médio-Superior	147,6	2.733.100	16,5	304.800	89
Alto Tietê (1)	62,4	1.155.600	26,7	494.400	57

(1) Não foi computada a carga orgânica biodegradável lançadas nos cursos de água enquadrados na classe 4, pertencentes à Bacia do Tietê Alto-Zona Metropolitana.

Fonte: COMITÊ COORDENADOR DO PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (1999).

O IQA (Índice de Qualidade das Águas) é obtido através das variáveis de qualidade de água de maior importância, ou seja, coliformes fecais, pH, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio total, fosfato total, temperatura, turbidez, resíduo total e oxigênio dissolvido. À medida que os rios avançam, a qualidade melhora por duas causas: a capacidade de autodepuração dos próprios rios e a diluição dos contaminantes pelo recebimento de água de melhor qualidade de seus afluentes. Esta recuperação, entretanto, além de não ser a mais recomendável, faz com que a qualidade da água dos rios atinja apenas os níveis aceitável ou boa. É muito difícil a recuperação ser total. Os dados da tabela 02 confirmam as observações feitas.

TABELA 02 - Trechos de rios, em quilômetros, classificados conforme seus IQAs no ano de 1989

Índices de Qualidade das Águas (IQAs) para Abastecimento Público dos Rios Afluentes ao Reservatório de Barra Bonita em 1989						
Rios	Avaliação das Extensões dos Rios (km)	Extensão (km) com IQA = Ótima	Extensão (km) com IQA = Boa	Extensão (km) com IQA = Aceitável	Extensão (km) com IQA = Imprópria para Tratamento Convencional	Extensão (km) com IQA = Imprória
Piracicaba, Atibaia, Cachoeira, Jaguari e	684	67	309	198	110	0
Soracaba	230	21	12	86	111	0
Tietê (1)	1090	30	660	195	119	86
Capivari	183	0	18	35	130	0
Jundial	123	0	29	9	49	36
Total em km	**2310**	**118**	**1028**	**523**	**519**	**122**
Total em %	—	**5,1%**	**44,5%**	**22,6%**	**22,5%**	**5,3%**

(1) Dados referentes a toda a extensão do rio e não somente ao trecho a montante do reservatório

Fonte: COMITÊ COORDENADOR DO PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (1999).

Portanto, as ações corretivas necessárias à recuperação da qualidade destes cursos d'água requerem a eliminação, nos níveis necessários, das cargas poluidoras de origem industrial e urbana, entre outras.

4 - O RESERVATÓRIO DE BARRA BONITA

Está localizado no Rio Tietê, no extremo jusante da bacia do Sorocaba / Médio Tietê, tendo o seu braço direito 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 tributários, de maior ou menor importância. Na figura 05 podem ser vistas algumas cidades que se localizam na região do reservatório:

FIGURA 05 - Imagem do satélite LANDSAT com algumas cidades localizadas na região do reservatório

Fonte: http://www.dpi.inpe.br (2003)

A uma altitude de 430 m e a uma distância de 250 km da cidade de São Paulo, o reservatório se localiza na região delimitada pelo trecho do Vale do

Tietê compreendido entre as barragens de Pirapora e Barra Bonita. Seguem algumas características do reservatório (tabela 03):

TABELA 03 - Características do Reservatório de Barra Bonita[8]

Características do Reservatório	
Condições de Montante	
Área da Bacia Hidrográfica	32.330 km^2
Área do Espelho d'Água no Nível Máximo Útil	310 km^2
Perímetro	525 km
Volume Morto	569 hm^3
Volume Útil	2.566 hm^3
Volume Reservado para Cheia de Projeto	487 hm^3
Volume Total	3.622 hm^3
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
Vazão Máxima Média Diária Observada (07/06/1983)	4.011 m^3/s
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 m^3/s

Fonte: AES TIETÊ (2003)

Os polinômios do reservatório[9], conhecidos como curvas cota x área x volume, que determinam a área e o volume do mesmo em função da cota do nível d'água, e o polinômio de jusante[10], que determina o nível d'água em função das vazões liberadas pelo reservatório, ou seja, a soma das vazões turbinadas e vertidas, são os seguintes (figuras 06 e 07):

[8] Documento interno da AES Tietê.
[9] Documento interno da AES Tietê.
[10] Documento interno da AES Tietê.

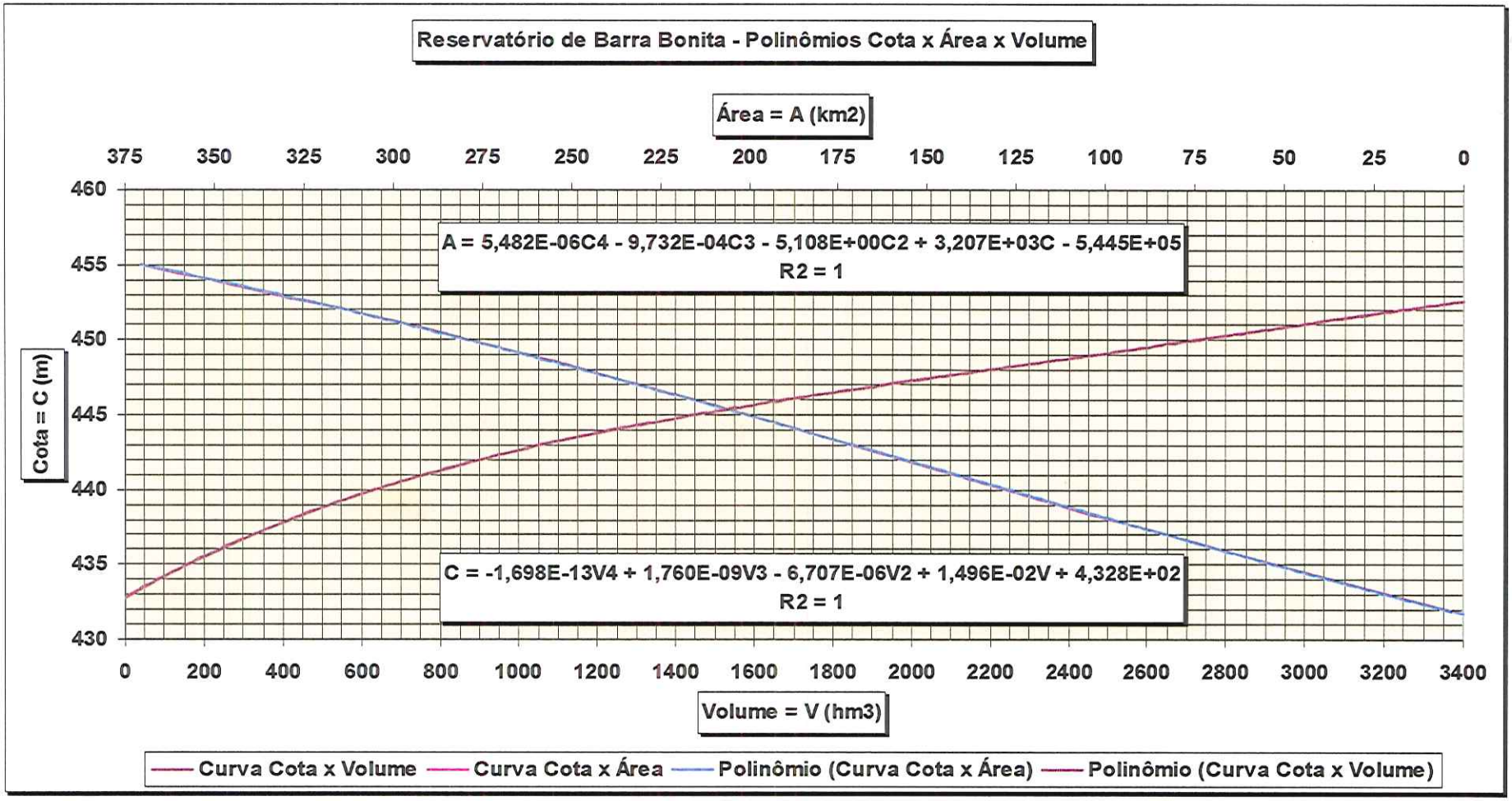


FIGURA 06 - Curva Cota x Área do Reservatório

Fonte: AES TIETÊ (2003)

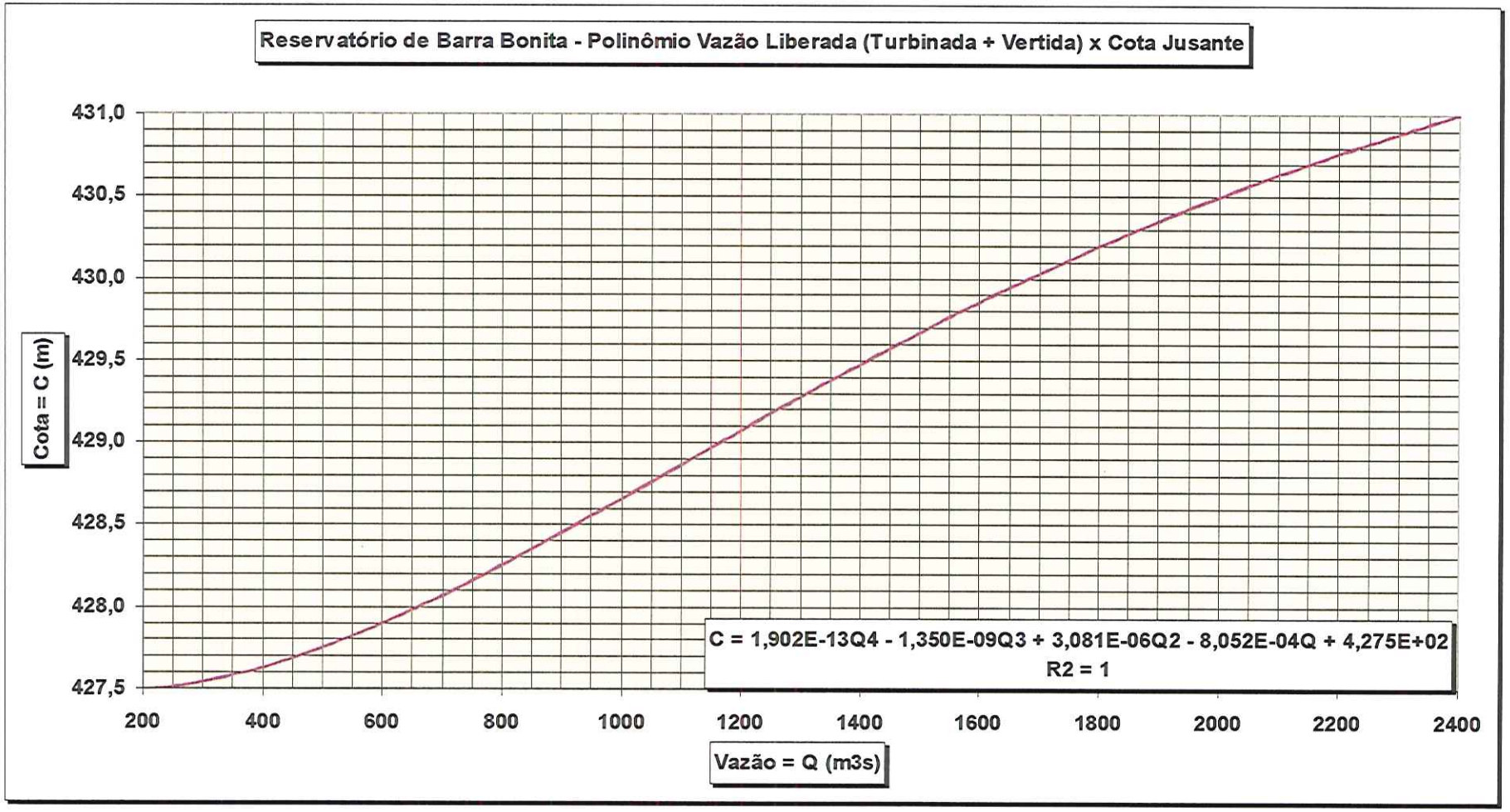


FIGURA 07 - Curva Vazão Liberada x NA a jusante do Reservatório

Fonte: AES TIETÊ (2003)

4.1 - Dados Climatológicos e Hidrológicos

4.1.1 - Clima e Pluviometria

O reservatório está localizado em uma região de transição entre os climas tropical e subtropical, onde as estações anuais não são bem definidas. As mudanças sazonais são pouco pronunciadas, sendo as diferenças mais nítidas entre o verão, que é a época de maior precipitação, e o inverno, período mais seco, com pouca ou nenhuma chuva. A precipitação anual nesta região chega a atingir uma média de 1300 mm (figura 08):

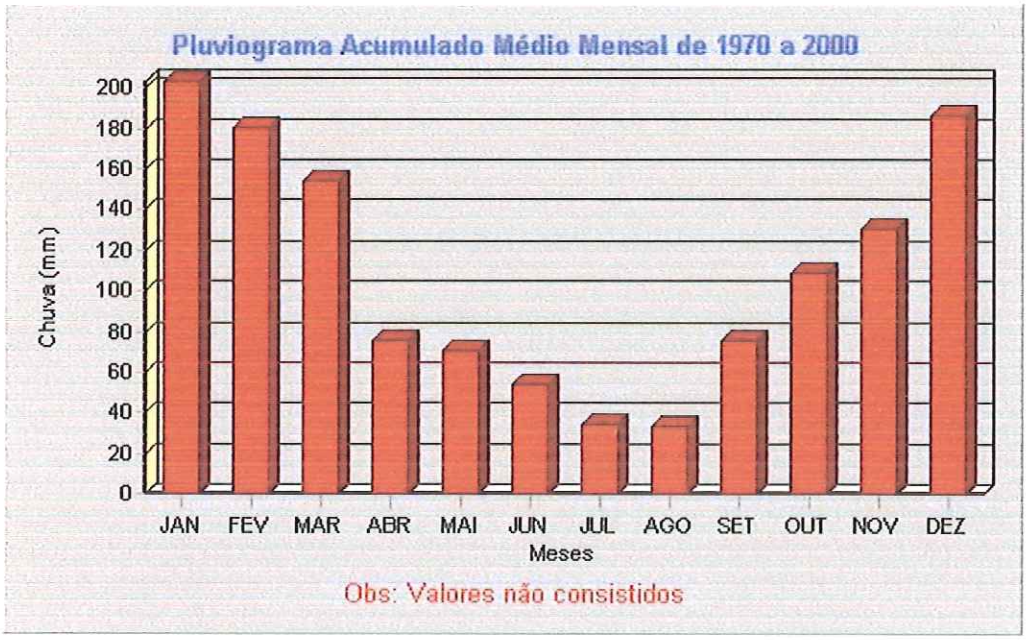


FIGURA 08 - Precipitação média mensal entre 1970 e 2000 na região do reservatório
Fonte: DAEE (2003)

No mês mais quente, a temperatura sempre está acima dos 22°C e no mês mais frio, a temperatura mínima é inferior a 18°C. De acordo com a classificação de Köppen, 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.cm^2 e 370 cal/min.cm^2, com média de 305 cal/min.cm^2, com dias que praticamente não apresentam insolação, até outros em que esta chega a

10h e 12min. 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, 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.cm^2 e 683 cal/min.cm^2, com média de 464 cal/min.cm^2, 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).

4.1.2 - Evaporação no Reservatório

A evaporação potencial será estimada através do Método de Penman, sendo necessárias as seguintes informações:

- Temperatura média (°C);
- Umidade relativa do ar (%);
- Radiação solar (cal/cm^2.dia);
- Número de horas de incidência solar real;
- Velocidade do vento.

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

$$E_0 = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{q_{ef}}{L} + E_i}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \qquad (1)$$

onde:

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

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. Prosseguindo:

$$\frac{q_{ef}}{L} = \frac{G(1-a) - \sigma \cdot T^4 (0{,}56 - 0{,}09 \cdot e_a^{\frac{1}{2}}) \cdot (0{,}1 + 0{,}9 \cdot p)}{L} \tag{3}$$

onde q_{ef} é a radiação efetiva sobre a superfície e L, o calor latente de evaporação.

G é radiação incidente de onda curta e é dado pela expressão:

$$G = Rt \cdot (0{,}24 + 0{,}58 \cdot p) \tag{4}$$

onde R_t é radiação no topo da atmosfera e p é a proporção entre o número efetivo de horas de brilho solar e o máximo possível, ou seja:

$$p = \frac{Insolação\ Média}{Insolação\ Máxima} \tag{5}$$

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:

$\sigma = 1{,}19.10^{-7}$ cal/cm^2.dia (constante de Stefan-Boltzman);
T = temperatura do ar em graus Kelvin (K).

A seguir, tem-se a tensão parcial de vapor d'água (e_a), dada por:

$$e_a = \frac{U \cdot e_s}{100} \tag{6}$$

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

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

onde:

T = temperatura do ar em °C.

e o termo p também é obtido através da equação 5. Finalmente, o termo E_i, que fornece a evaporação nas condições isotérmicas, é dado por:

$$E_i = 0{,}35 \cdot \left(0{,}5 + \frac{w_2}{160}\right) \cdot (e_s - e_a) \tag{8}$$

onde w_2 é a velocidade do vento a 2 metros e e_s e e_a são dadas pelas equações 7 e 6, respectivamente. Mais detalhes sobre o método de Penman podem ser vistos em TUCCI & BELTRAME (1998).

Portanto, prossegue-se ao cálculo da evaporação potencial no reservatório. Os dados iniciais são (tabela 04):

TABELA 04 - Dados de entrada para o cálculo da evaporação (valores médios mensais)

UR (%) *	60
T (°C) *	24
T (K)	297
Insolação Média (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

Fontes:

* http://www.inmet.gov.br

** CALIJURI (1999)

*** TUCCI & BELTRAME (1998)

A seguir, na tabela 05, temos os cálculos de E_0, que é dado em mm/dia:

TABELA 05 - Dados de entrada para o cálculo da 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

Portanto,

$$E_0 = 1315 \text{ mm/ano}$$

4.1.3 - Fluviometria

As vazões foram determinadas através do Software REGDAEE, desenvolvido pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) em 1997, visando a regionalização hidrológica no estado de São Paulo.

A vazão mínima, bem como sua duração, é um dos indicadores da disponibilidade hídrica de um local. Na prática, a vazão mínima instantânea tem pouca utilidade. As vazões mínimas, com durações 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 7 dias consecutivos com período de retorno de 10 anos, denominada $Q_{7,10}$, que será calculada pela metodologia do REGDAEE e pode ser matematicamente representada por:

$$Q_{7,10} = C \times x_T \times (A + B) \times \overline{Q} \qquad (9)$$

Onde os parâmetros C, 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 interessante saber a amplitude de variação das vazões e, principalmente, a freqüência com que determinada vazão ocorre em cada seção do rio. Para isso utiliza-se a curva de permanência, sendo a vazão de 95% da curva de permanência, conhecida como $Q_{95\%}$, outro importante indicador da disponibilidade de recursos hídricos.

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

$$\overline{Q}(l/s) = (b + c \times \overline{P}) \times AD \qquad (10)$$

Os parâmetros b e c são tabelados, $\overline{P}$ 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 da disponibilidade hídrica na região do reservatório. Primeiramente, delimita-se a

área de contribuição ao reservatório, conforme indicado na figura 09. Em seguida, determina-se, conforme figura 10, os valores da vazão média plurianual $\overline{Q}$, da $Q_{7,T}$, onde T é o período de retorno em anos, e da curva de permanência.

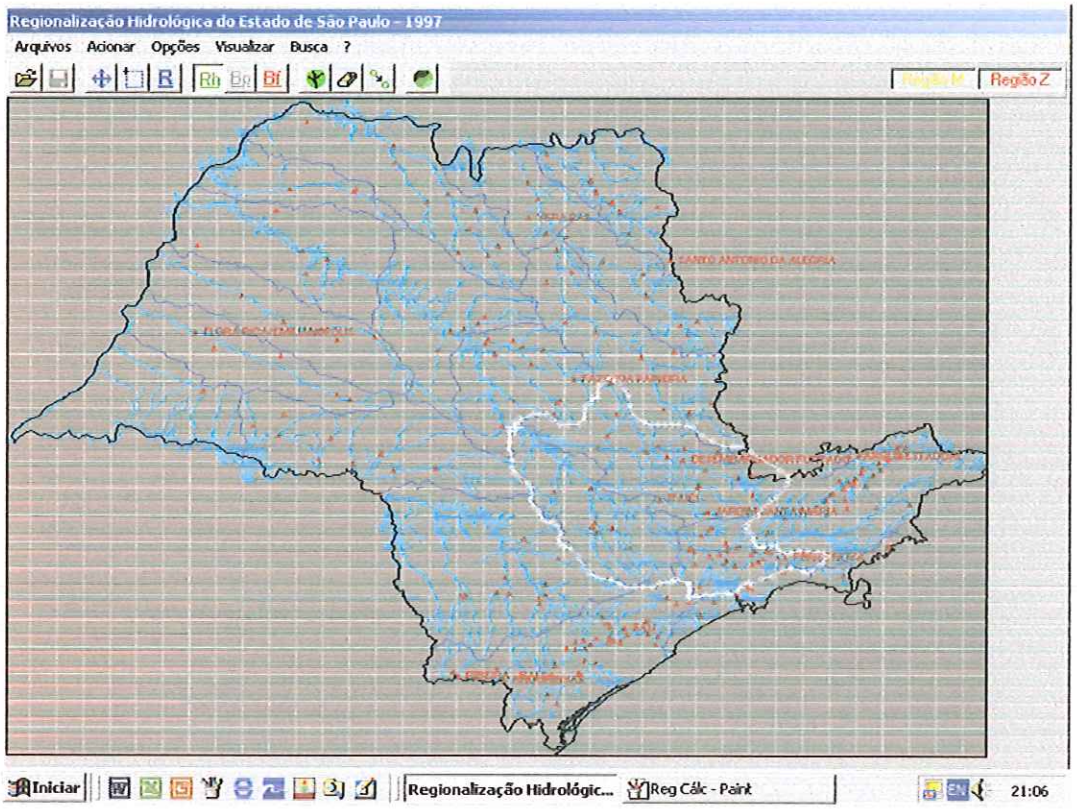


FIGURA 09 - Tela do RegDAEE, com a bacia de contribuição ao Reservatório de Barra Bonita circulada

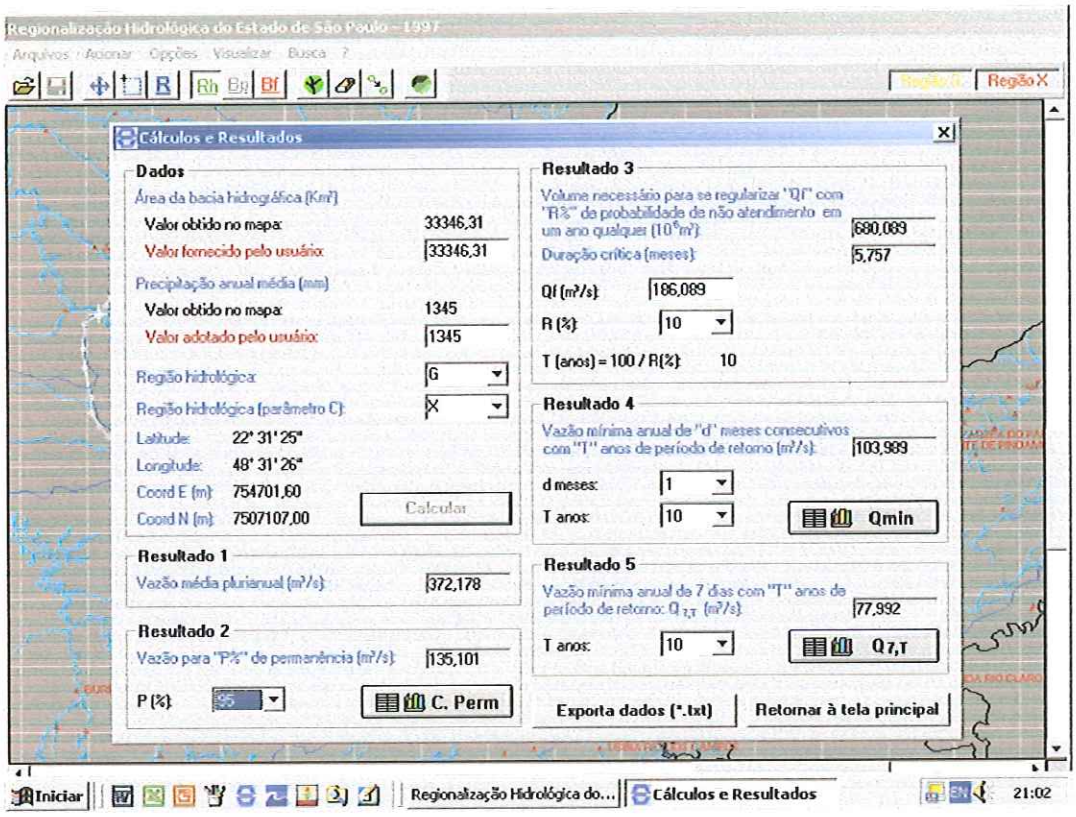


FIGURA 10 - Tela de cálculo do RegDAEE

Desta forma, conclui-se que $\overline{Q}$ = 372,2 m³/s. Em seguida, temos os resultados da $Q_{7,T}$ (tabela 06 e figura 11) e da curva de permanência (tabela 07 e figura 12):

TABELA 06 - Valores de $Q_{7,T}$

T(anos)	Q(m³/s)
10	77,992
15	72,562
20	69,23
25	67,009
50	61,209
100	56,89

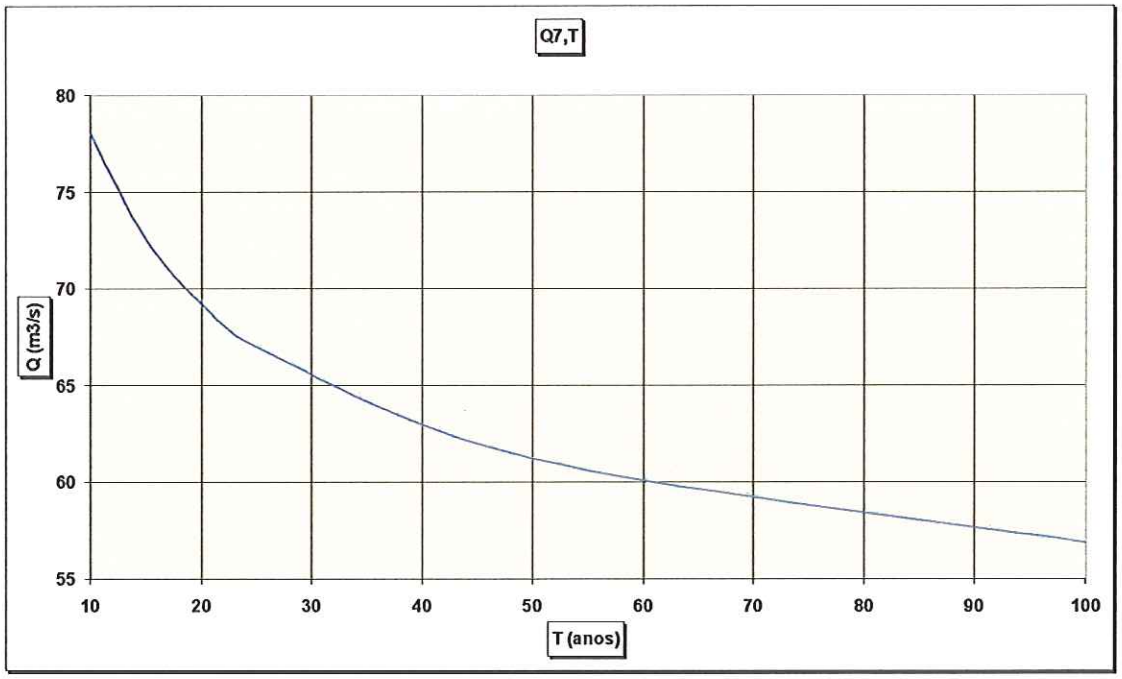


FIGURA 11 - Gráfico de $Q_{7,T}$

TABELA 07 - Valores da curva de permanência

P(%)	Q(m^3/s)
5	891,739
10	738,029
15	619,304
20	536,681
25	467,084
30	417,212
40	343,52
50	293,649
60	252,709
70	220,329
75	203,581
80	188,322
85	174,552
90	156,315
95	135,101
100	82,996

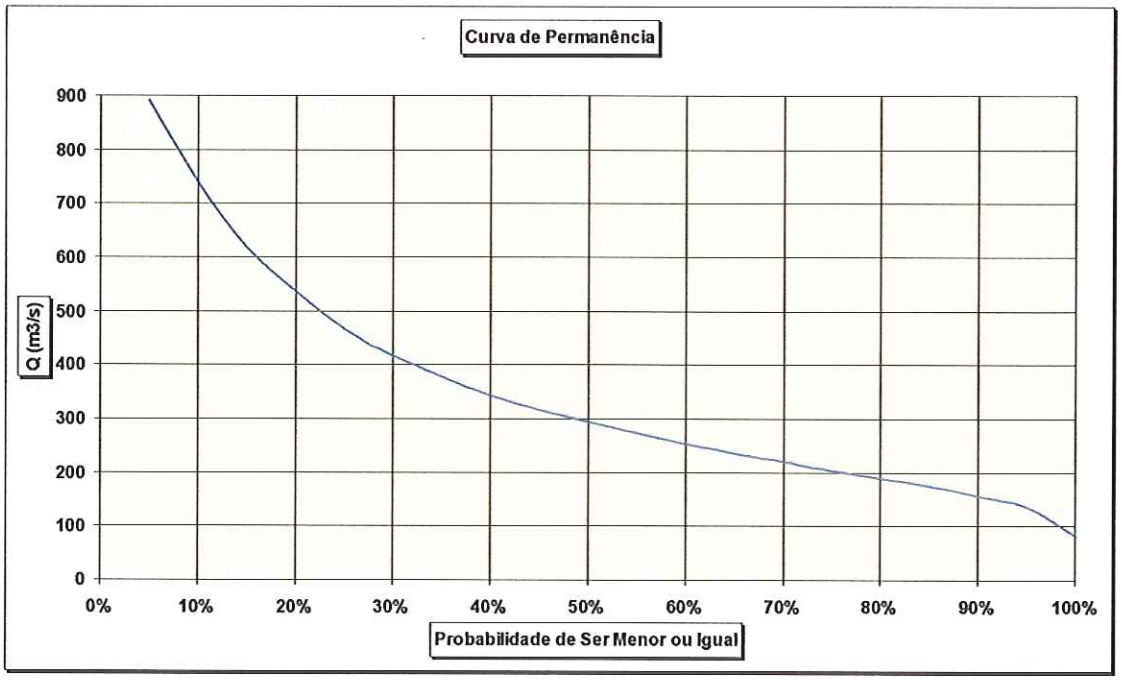


FIGURA 12 - Gráfico da curva de permanência

4.2 - Assoreamento

O processo da sedimentação tem início na desagregação do solo por vários agentes, seu transporte pelas correntes de águas, até sua deposição final. O sedimento transportado pelo curso d'água ao alcançar o reservatório encontra baixa velocidade e tende a se depositar. Isso ocorre desde a entrada do reservatório, onde é maior a deposição, até a barragem, principalmente na direção natural do antigo perfil longitudinal do curso d'água. A redução da capacidade do reservatório é feita gradualmente em todas as cotas, de acordo com CARVALHO (1994).

O material constituído de partículas maiores fica depositado na entrada do reservatório com a formação de um "delta" aluvional. À medida que a velocidade diminui e, este depósito ocorre cada vez mais no interior têm-se partículas de menor peso no reservatório. As partículas maiores, mais pesadas, vão se depositando e sobrando as finas até restar uma corrente de densidade que é um escoamento de fluido com partículas finíssimas, mas com densidade ligeiramente diferente da água. Os sedimentos finos vão se depositar no pé da barragem. Fica restando uma corrente com partículas finas que podem se

movimentar em círculos, girando do fundo para a superfície e retornando ao fundo.

As partículas vão se depositando na entrada do reservatório em camadas que avançam gradualmente para jusante, formando novos deltas. A montante do delta são encontrados grãos maiores que os de jusante.

Até o momento, poucas discussões no sentido do planejamento desta evolução, ou do seu monitoramento, foram efetuadas nos reservatórios do Estado de São Paulo. De fato, o problema do assoreamento de reservatórios não tem merecido, por parte das concessionárias de energia elétrica, muita atenção quanto aos seus monitoramentos. Sendo assim, não existem informações sobre a atual situação do assoreamento no Reservatório de Barra Bonita.

Há uma certa preocupação sobre a curta vida útil dos reservatórios de grande porte, localizados em bacias de elevada taxa de erosão, como a Bacia Hidrográfica do Reservatório de Barra Bonita. Sabe-se que o processo ocorre, pois o local apresenta características condicionantes ao assoreamento por ser considerado um "velho" reservatório do Estado de São Paulo e se encontrar em uma região de agricultura intensa e pouca cobertura vegetal nativa, o que favorece em muito o processo.

O assoreamento dos reservatórios pode causar os seguintes efeitos:

- Redução do volume d'água acumulado até inviabilizar o empreendimento;
- Efeitos sobre as estruturas; aumento de pressão na barragem, corrosão dos canais de adução e fuga, pás das turbinas e obstrução do sistema de refrigeração;
- Afogamento de locais de desova, alimentação e abrigo dos peixes;
- Formação de bancos de areia, alterando e dificultando as rotas de navegação.

4.3 - Limnologia

Trata-se de um ecossistema polimítico, com uma profundidade média relativamente grande em relação aos outros reservatórios do estado, e

eutrófico, com flutuações de volume e tempo de retenção que caracterizam regimes de funcionamento ecológico diversificado durante o período sazonal. Durante esses períodos, há dominância variada de grupos fitoplactônicos e uma variação no índice de estado trófico. A eutrofização cultural é resultante do aporte de despejos domésticos, industriais e de fertilizantes químicos empregados nas culturas distribuídas por toda a bacia. O regime térmico anual está relacionado principalmente com efeitos do vento, apresentando períodos de isotermia e estratificação no ciclo diurno.

No verão, período de maior precipitação, o reservatório se caracteriza pela baixa transparência da água, zona eutrófica reduzida, aumento de material, principalmente inorgânico, em suspensão e mudança na qualidade ótica da água, devido à quantidade de material orgânico dissolvido. As águas do reservatório contêm uma alta concentração de oxigênio dissolvido, uma alta condutividade, que aumenta durante o período seco, grandes concentrações de nutrientes inorgânicos, principalmente nitrogenados, oriundos das atividades agrárias na região, maiores concentrações de clorofila e conseqüentemente maior produção primária do fitoplâncton. Nesse período, ocorre menor intensidade do vento e a luz é o principal fator limitante da produção primária.

No inverno, período de menor precipitação, o reservatório é caracterizado por uma alta transparência da água, aumento na zona eutrófica, menor quantidade de material em suspensão, tanto orgânico como inorgânico, mudança na qualidade ótica da água. Ocorrem também um aumento na condutividade da água, diminuição das concentrações de nutrientes inorgânicos e de clorofila, quando comparadas às do verão e conseqüentemente menor produção primária do fitoplâncton. A intensidade do vento é maior, provocando maior turbulência e acarretando na presença de oxigênio dissolvido até o hipolímnio e conseqüentemente uma maior precipitação de fósforo no sedimento.

O tempo de residência da água depende do ciclo hidrológico, sofrendo variações com os fatores geográficos e varia de 30 dias, no verão, até 6 meses no inverno. A freqüência de chuva e o volume de precipitação vão reger a operação da barragem. Na estação chuvosa, após atingir o limite de estocagem, o vertedor passa a controlar o volume da represa, aumentando o fluxo e com isso diminuindo o tempo de residência da água, de nutrientes e de

organismos dentro do sistema. Desta forma, não há dúvidas de que as oscilações no nível trófico do reservatório, principalmente no que se refere aos produtores primários a nutrientes, relacionam-se com as variações no tempo de residência da água, aos fatores de diluição e a entrada de esgotos por despejos.

Esta análise dos mecanismos de funcionamento de reservatórios e o aprofundamento do conhecimento sobre os principais processos que neles ocorrem são fundamentais para o planejamento de usos múltiplos e para a adoção de técnicas de manejo, controle ambiental e recuperação.

No Reservatório de Barra Bonita há uma série de processos na bacia hidrográfica que traz como conseqüência inúmeras alterações no mesmo. O primeiro processo mais grave é o da eutrofização, resultado da entrada de nitrogênio e fósforo nas águas, a partir de resíduos de origem doméstica e da agricultura, em larga escala, e da agroindústria. O outro processo é a intensa entrada de material em suspensão, com efeitos adicionais na biota aquática, principalmente nos organismos em suspensão. Estes dois processos merecem atenção e justificam a tomada de medidas preventivas na bacia hidrográfica e no reservatório. Há outros impactos relacionados ao uso de pesticidas e à descarga de despejos industriais, o que elevou consideravelmente o nível de toxicidade do reservatório (CALIJURI e TUNDISI, 1990).

4.4 - Usos Múltiplos na Região do Reservatório

4.4.1 - Usos Consuntivos

Os usos consuntivos da água são aqueles em que ocorrem perdas, parciais ou até totais, entre o que é captado e o que retorna ao curso d'água natural e sua consideração é indispensável na elaboração do balanço entre a disponibilidade e a demanda hídrica.

4.4.1.1 - Abastecimento Urbano e Industrial

São todos os usos gerados em cidades, vilas ou qualquer núcleo urbano, para fins de abastecimento doméstico, comercial, público e industrial. A

demanda é constituída pela doméstica, acrescida de outras que se referem às atividades que dão origem ao núcleo urbano, como a indústria o comércio e a prestação de serviços públicos e privados.

As demandas de água nos núcleos urbanos são obtidas através da determinação da população abastecida e da adoção de cotas per capta de consumo, no caso do uso urbano. As demandas industriais são obtidas à parte, variando com o tipo de indústria o ou processo industrial em questão.

Nenhum dos municípios localizados na região do reservatório utiliza suas águas para fins urbanos, certamente devido à sua má qualidade, o que acarretaria em altos custos no seu tratamento. Segundo COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO SOROCABA-MÉDIO TIETÊ (1999), são utilizadas as águas de pequenos rios da região, sendo que de alguns, não existem informações hidrológicas que possibilitariam a realização de um balanço hídrico. Também há registros do uso de águas subterrâneas para este fim.

4.4.1.2 - Irrigação

É uma prática utilizada de forma a complementar a necessidade de água das culturas agrícolas, naturalmente promovida pela precipitação. Proporciona ao solo um teor de umidade suficiente para o crescimento das plantas.

Como em diversas regiões do estado de São Paulo e de todo o Brasil, é precário o conhecimento sobre o uso da água para este fim na região do reservatório. Essa falta de informações é preocupante, pois a irrigação é o uso consuntivo da água de maior demanda, o que gera a necessidade de cuidados e técnicas especiais para seu aproveitamento racional, visando o mínimo de desperdício.

Quando feita de forma incorreta, além de problemas relacionados à quantidade, a irrigação pode afetar tanto a qualidade do solo, quanto a dos recursos hídricos, tanto superficiais como subterrâneos, devido à presença de fertilizantes, corretivos e agrotóxicos nas culturas.

4.4.2 - Usos Não Consuntivos

Os usos não consuntivos da água são aqueles em que, quando há captação de água, a totalidade do que é captado retorna ao curso d'água natural. Existem usos nos quais não ocorre captação ou derivação da água, como a navegação e o turismo, entre outros.

4.4.2.1 - Geração de Energia Elétrica

É a principal forma de uso não consuntivo da água. O potencial elétrico de uma região é definido através do produto das vazões e das quedas d'água disponíveis e geralmente é aproveitado através da construção de reservatórios de acumulação e regularização de vazão, para que se possa ter um maior controle sobre a geração de hidroeletricidade.

É o principal uso a que as águas do reservatório estão submetidas, mesmo porque é a finalidade principal para que o mesmo foi construído.

A UHE Barra Bonita possui capacidade instalada para utilizar 780 m^3/s em suas turbinas na geração de energia hidrelétrica. No entanto, de acordo com a Companhia de Operação da Geração (COG) da AES Tietê, quem define estas demandas é o Operador Nacional do Sistema (ONS), em conjunto com o Sistema Interligado Nacional (SIN).

Deve-se ressaltar que a construção de barragens causa alterações no regime dos cursos d'água, perdas por evaporação nos reservatórios, principalmente em regiões semi-áridas, e diversas alterações no meio físico.

4.4.2.2 - Navegação Fluvial

Para que sejam obtidas condições de navegação comercial em rios, é necessário que, em maior parte possível do tempo, exista nos rios vazão suficiente para permitir o tráfego de embarcações de determinado calado. Como essa condição nem sempre ocorre normalmente, pois a maioria dos rios é navegável apenas nos períodos de águas altas, são realizadas obras de regularização de vazão nos canais, aumentando-se o período em que a navegabilidade é assegurada.

A criação de reservatórios pode trazer melhorias à navegação em um dado curso d'água. No entanto, se a construção das barragens não for planejada considerando o uso do rio para a navegação, isto pode se tornar um sério obstáculo, mas que pode ser solucionado através de eclusas de transposição de níveis.

No Sistema Tietê-Paraná, formaram-se imensos lagos após a construção dos reservatórios, possibilitando a navegação a barcos de grande porte. Visava-se com isso, o estabelecimento de um fluxo de transportes mais baratos do que o rodoviário e o ferroviário para economizar os combustíveis derivados do petróleo. Havia também a intenção de se interligar as regiões geoeconômicas do estado, reativando os centros produtores distantes das áreas consumidoras, e ainda, atingir diversos municípios do Paraná, sul de Goiás, Mato Grosso do Sul, parte do Triângulo Mineiro e finalmente, os países vizinhos do chamado Cone Sul do continente.

Desta forma, a Hidrovia Tietê - Paraná (figura 13) foi concebida sob a ótica do aproveitamento múltiplo das águas, de modo que atualmente é formada por um conjunto de 11 reservatórios, dentre eles o de Barra Bonita, oriundos do represamento para geração de hidroeletricidade. Destes reservatórios, 4 se localizam no Rio Paraná e outros 6 no Rio Tietê. A hidrovia possui 2400 km de extensão navegável, todos em território nacional, possuindo 3 tramos distintos:

- O Tramo Tietê, que vai de Santa Maria da Serra - SP (Rio Piracicaba) e de Conchas - SP (Rio Tietê) até o Canal Pereira Barreto;
- O Tramo Sul do Rio Paraná, que vai de Foz do Iguaçu - PR e Ciudad Del Leste - Paraguai, até o Canal de Pereira Barreto.
- O Tramo Norte do Rio Paraná, que vai de São Simão - GO e Iturama - MG até o Canal Pereira Barreto.

No Rio Tietê, os obstáculos foram vencidos através de técnicas que permitiram o aprofundamento do leito fluvial, o balizamento do rio com bóias, o derrocamento subaquático com explosivos e ainda, a superação de problemas como os desníveis, através da construção de eclusas. Também foram vencidos os obstáculos representados pelas pontes existentes no rio, sobretudo a antiga

ponte metálica de Barra Bonita, que foi dotada de vão central móvel e equipada com motores elétricos para levantar seu piso, dando passagem aos navios.

FIGURA 13 - A Hidrovia Tietê-Paraná

Fonte: http://www.adtp.org.br (2003)

O trecho do Tietê próximo à região metropolitana sempre apresentou mais dificuldade à navegação. Para melhorar suas condições de navegabilidade, já em 1912 foram feitos obras de escavação, retificação e balizamento de canais. Dez anos depois, as obras de drenagem continuaram com a abertura de novos canais e a limpeza das margens, e ainda hoje são realizadas obras de aprofundamento, drenagem e retificação. A ligação da Grande São Paulo com o Médio Tietê, contudo, é bastante complexa, devido ao desnível de 260 metros entre a região metropolitana e a cidade de Itu, que exigiria a construção de dezesseis eclusas para ser superado.

Segundo a AES Tietê, Para a 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 hm^3, cerca de 53% da capacidade total. Portanto, há possibilidade de conflito entre este fim e a geração de energia pela UHE, principalmente em períodos de estiagem.

Deve-se levar em conta, também, o consumo de água do reservatório pela eclusa de transposição de nível. Construída pela CESP, a eclusa está operando desde 1962 e dista a 3 Km da cidade de Barra Bonita. A Eclusa de Barra Bonita (foto 05) 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 a bacia de acumulação da hidrelétrica. Seguem algumas características (tabela 08):

TABELA 08 - Características da Eclusa de Barra Bonita

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 (2003)

FOTO 05 - A Eclusa de Barra Bonita
Fonte: http://www.transportes.gov.br (2003)

Segundo a AES Tietê, o número de eclusagens realizadas nos últimos 6 anos foi o seguinte[11] (tabela 09):

TABELA 09 - Número de eclusagens realizadas no período de 1997 a 2002

Número de Eclusagens	
1997	3116
1998	2510
1999	3037
2000	2934
2001	2179
2002	2586
Média Anual	2727
Média Mensal	227

A partir destes dados e das dimensões da eclusa, é possível determinar a quantidade média de água consumida mensalmente para este fim:

[11] Documento interno da AES Tietê.

$$Q_{Ecl} = \frac{C_{Ecl} \cdot L_{Ecl} \cdot D_{Máx} \cdot N_{Mês}}{86400 \cdot 30} \quad (10)$$

onde:

Q_{Ecl} = Vazão média mensal consumida nas eclusagens (m^3/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,

$$Q_{Ecl} = \frac{147{,}25 \cdot 11{,}76 \cdot 24 \cdot 227}{86400 \cdot 30} = 3{,}64 \ m^3/s$$

4.4.2.3 - Pesca

Um reservatório pode ser associado à solução de um dos grandes problemas brasileiros: a fome. Este pode ser usado para a pesca, pois os peixes são excelentes conversores de alimentos e fornecem proteína da melhor qualidade, podendo satisfazer em parte as necessidades de alimentação de uma pequena população. Muitos reservatórios, mesmo não tendo nenhuma medida específica de piscicultura, devido à sua natural eutrofização, têm aumentado bastante a produção local de algumas espécies de peixes.

A reprodução dos peixes envolve controles que podem ser feitos em tanques à margem do reservatório e, para isto, há casos em que ocorre captação de água para o enchimento de tanques e pequenos açudes. Segundo COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ (1999), há registros destas atividades nas margens do reservatório.

4.4.2.4 - Recreação e Turismo

É bastante incomum a construção de reservatório deste porte para recreação. Os benefícios neste setor são geralmente casuais, decorrentes de outras funções de aproveitamentos. O tipo ideal do reservatório, para este uso, é permanecer praticamente cheio durante as épocas de férias, possibilitando atividades náuticas, pesca, natação e outros esportes aquáticos. Os reservatórios sujeitos a grandes variações do nível de água não apresentam em geral uma boa integração na paisagem e geram problemas de manutenção das margens e ancoradouros.

Barra Bonita, cidade plantada às margens do rio Tietê (foto 06), se tornou um pólo turístico beneficiado pela hidrovia, com um passeio pitoresco que resgata um pouco da história de nosso país.

FOTO 06 - Vista da cidade de Barra Bonita

Deparar-se com um rio Tietê limpo, comparado ao trecho paulistano, e navegável é sem dúvida a melhor surpresa reservada pela visita a Barra Bonita. Além do processo de eclusagem, pode-se observar as garças que

sobrevoam o Tietê ou que ficam nas comportas à espera dos peixes. Mas as margens do rio não reservam grandes surpresas ou belezas naturais.

4.4.2.5 - Controle de Enchentes

O reservatório deve ter suficiente volume de espera para permitir retenção das ondas de cheias em épocas das elevadas precipitações. A segurança da área protegida não é de 100%. Entretanto, a cheia de projeto, seja a vazão que pode ser esperada em conseqüência do conjunto mais desfavorável de condições meteorológicas e hidrológicas, pode corresponder a 100% da máxima cheia provável da bacia. A finalidade principal do reservatório é armazenar uma parte das vazões de enchente, minimizando o pico da cheia, no local a ser protegido.

No caso do Reservatório de Barra Bonita, os volumes reservados para amortecimento de cheias foram determinados a partir da diferença entre o volume total do mesmo e as metas de armazenamento[12] no último ano, fornecidas pela AES Tietê (figura 14):

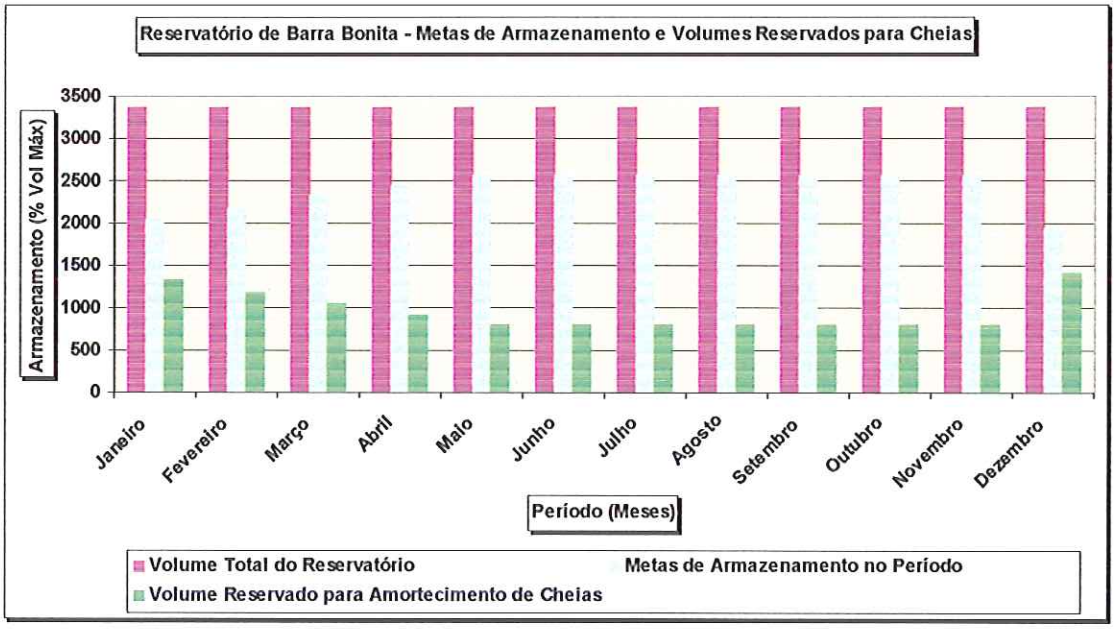


FIGURA 14 - Volume total, volumes meta e volumes reservados para amortecimento de cheias no reservatório

[12] Definidas pela AES Tietê em conjunto com o ONS. Documento interno.

4.4.2.6 - Diluição e Transporte de Resíduos

Embora não sendo classificado como consuntivo, este uso poderá limitar ou até mesmo impedir o uso da água ou do curso d'água para outras atividades, devido às restrições quanto aos padrões de qualidade requeridos. Este é o caso do Reservatório de Barra Bonita, que recebe as águas dos Rios Piracicaba e Tietê, que recebem os despejos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Campinas, respectivamente. Desta forma, o uso de suas águas para fins urbanos e industriais torna-se inviabilizada.

4.4.2.7 - Vazão Ecológica

Deve-se garantir nos rios um mínimo de vazão que seja suficiente para a oxigenação das águas e manutenção da vida. No caso de Barra Bonita, recomenda-se, segundo a AES Tietê, que seja garantida uma vazão ecológica de 160 m^3/s a jusante do reservatório.

4.5 - A Usina Hidrelétrica de Barra Bonita

A Usina Hidrelétrica de Barra Bonita está localizada na Bacia do Rio Tietê, à altura quilômetro 480 do rio, entre os municípios de Barra Bonita e Igaraçu do Tietê. A seguir, estão algumas imagens (fotos 07 e 08) da sala de operação da UHE

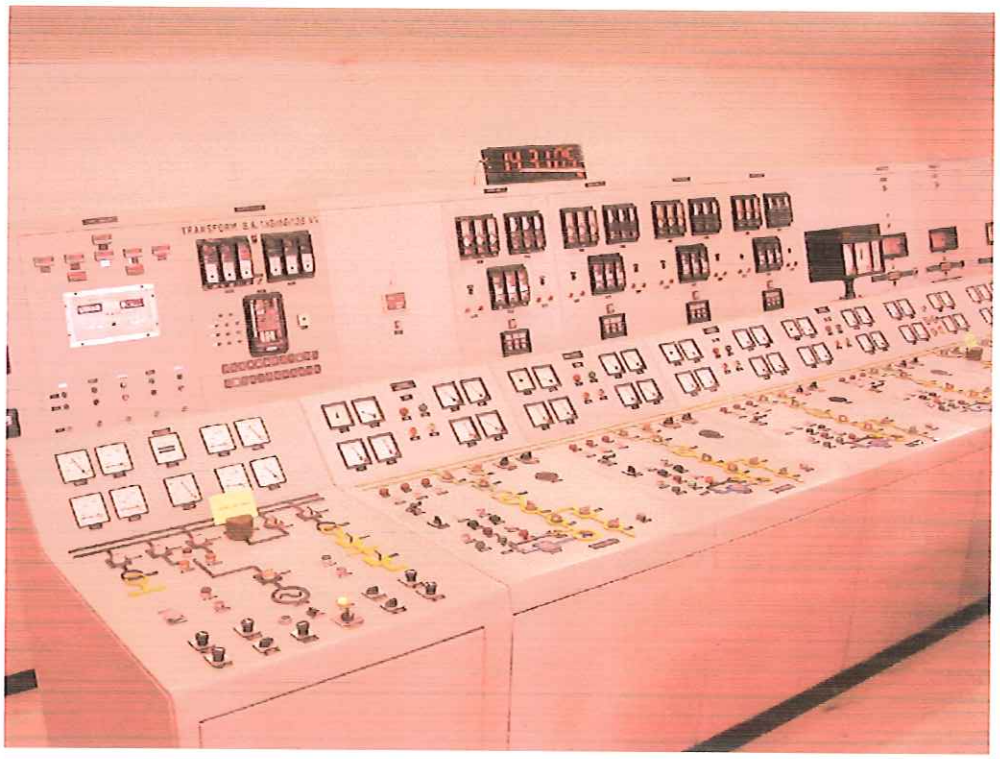


FOTO 07 - Sala de controle da UHE

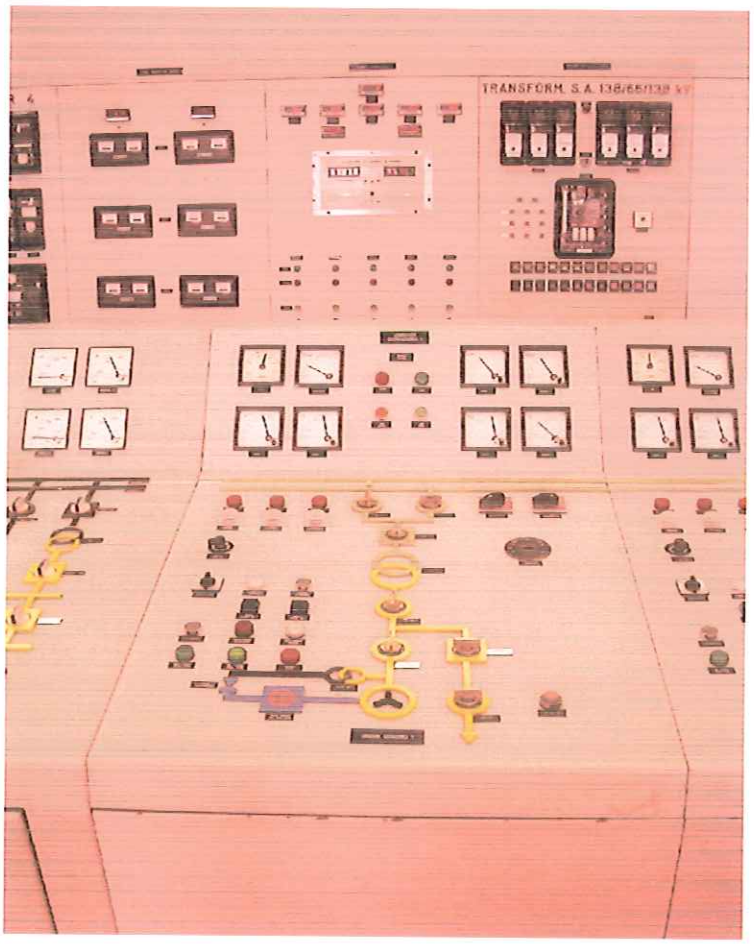


FOTO 08 - Detalhe do painel de comando

A UHE faz parte do grande complexo de barragens e usinas hidrelétricas localizadas ao longo do Rio Tietê. A Jusante, encontram-se as usinas de Bariri, Ibitinga, Promissão, Nova Avanhandava e Três Irmãos, todas no Rio Tietê. Seguem algumas características[13] (tabela 10) e uma imagem (foto 09) da barragem de concreto e dos órgãos de descarga:

TABELA 10 - Dimensões da barragem e dos vertedores

Barragem de Concreto	
Comprimento	480 m
Cota do Topo	454,5 m
Altura Máxima	32,5 m
Órgãos de Descarga	
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
Vazão Máxima por Vão no Nível Útil	704 m^3/s
Vazão Máxima por Vão no Nível Máximo Maximorum	906 m^3/s
Vazão Máxima Total no Nível Máximo Maximorum	4.530 m^3/s

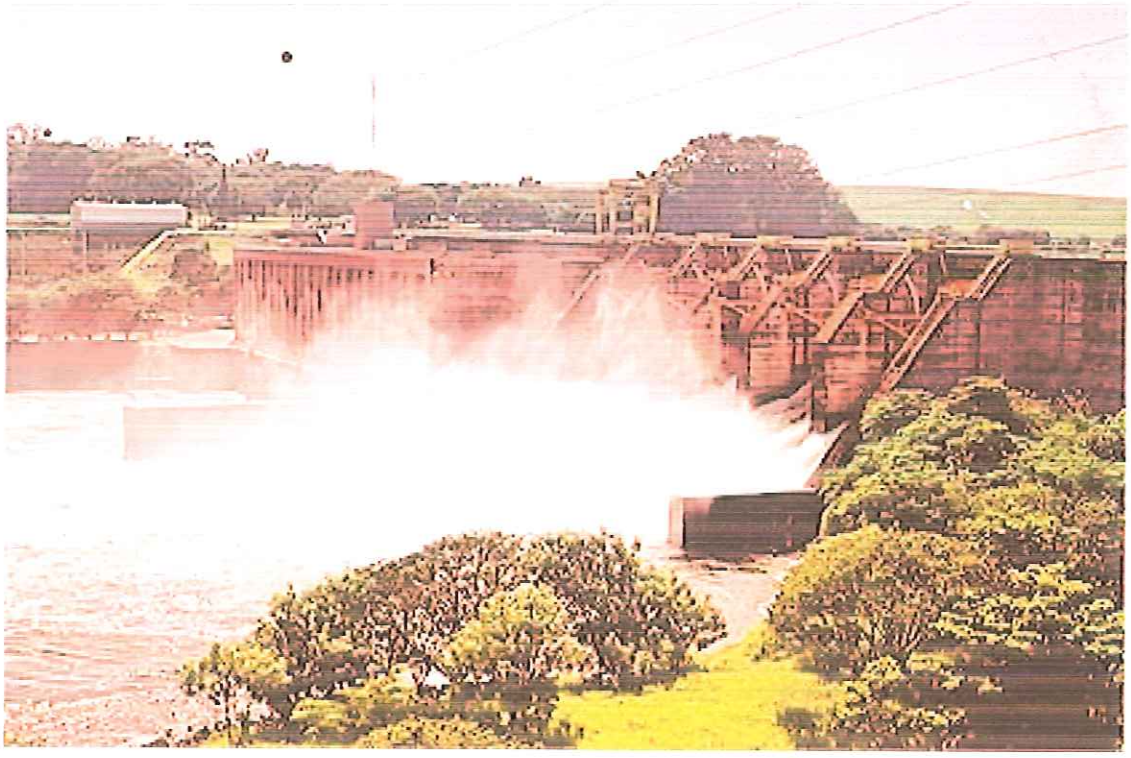


FOTO 09 - A barragem da UHE Barra Bonita

Fonte: FIDALGO (2002)

[13] Documento interno da AES Tietê.

A seguir, estão algumas características[14] (tabela 11) e imagem (foto 10, 11 e 12) das unidades geradoras

TABELA 11 - Dados das unidades geradoras

Unidades Geradoras (UGs)	
Turbinas	
Tipo	Kaplan
Quantidade	4 unidades
Potencia Nominal (Queda de 23 m)	34.800 kW
Queda Máxima	25 m
Queda Nominal	23,5 m
Queda Mínima	12 m
Engolimento Nominal	195 m^3/s
Vazão Turbinada Nominal Total	712 m^3/s
Velocidade Nominal	128,6 rpm
Velocidade de Disparo	337 rpm
Diâmetro do Rotor	4,85 m
Geradores	
Tipo	Umbrela Eixo Vertical
Potência Nominal Unitária	35.190 kW
Potência Nominal Total Instalada	140.760 kW

FOTO 10 - Unidades geradoras da UHE Barra Bonita

[14] Documento interno da AES Tietê.

FOTO 11 - Vista de uma das unidades geradoras

FOTO 12 - Pá de turbina desativada, utilizada como decoração da entrada da UHE

Em seguida, encontram-se algumas informações[15] (tabela 12) e uma imagem (foto 13) da subestação elevadora

TABELA 12 - Características da subestação elevadora

Subestação Elevadora	
Número de Circuitos	8 unidades
Tensão Nominal	138 / 69 kV

FOTO 13 - Vista da subestacão elevadora

[15] http://www.aestiete.com.br

5 - METODOLOGIA

5.1 - Generalidades

Será feita a otimização da geração de energia pela usina hidrelétrica, através de um modelo de programação linear, com o objetivo de maximizar a vazão turbinada.

Em seguida, a partir dos resultados da otimização da geração de energia, será feita simulação computacional dos usos múltiplos das águas do reservatório, a fim de se fazer a modelagem numérica da sub-bacia referente à área de influência do reservatório, para se obter índices de desempenho conhecidos como confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, além de índices fornecidos pelo próprio modelo de simulação a ser utilizado. Estes índices auxiliam na avaliação da freqüência, magnitude e duração dos possíveis conflitos existentes.

Serão analisados a geração de energia, a navegação, o armazenamento no reservatório e a ocorrência de enchentes na cidade de Barra Bonita, localizada a jusante do reservatório.

A seguir, será feita a descrição de cada uma destas etapas.

5.2 - Otimização da Geração de Energia

Será proposto um modelo de otimização da operação do Reservatório de Barra Bonita, através de uma rotina de programação linear, visando um planejamento a médio prazo.

5.2.1 - Descrição da Metodologia

A análise foi feita em um horizonte de planejamento de 12 meses e intervalo de discretização mensal. A otimização da geração de energia foi feita através da maximização da vazão turbinada, obedecendo a várias restrições, impostas pelas características físicas do local e pelos outros usos a que as águas do reservatório estão submetidas. Estas restrições são as seguintes:

- O valor volume do reservatório deverá estar entre o intervalo de 1800 hm^3, que é o volume mínimo para a navegação (obtido através da curva cota x volume), e o volume útil do reservatório, que será considerado como volume máximo para este estudo;
- Será permitido um deplecionamento, que é a variação do volume do reservatório entre períodos consecutivos, de 20% no máximo;
- Os valores de vazões turbinadas deverão estar entre o intervalo de 10 m^3/s, que é o mínimo exigido para que a geração de energia em cada turbina seja possível[16], e 780m^3/s, que é o engolimento máximo do sistema, considerando as 4 turbinas em conjunto;
- Os valores das vazões vertidas não deverão ultrapassar os 4530 m^3/s, que é a capacidade máxima dos vertedores;
- Os valores das vazões liberadas pelo reservatório, ou seja, a soma entre as vazões turbinadas e vertidas, deverão estar no intervalo de 78 m^3/s, a $Q_{7,10}$, e 2000 m^3/s, a vazão máxima a partir da qual ocorrem enchentes e inundações na cidade de Barra Bonita e em outros locais a jusante do reservatório. Na restrição de vazão mínima a jusante, não foi utilizado o valor da vazão ecológica mínima, que é de 160 m^3/s, pois segundo a AES Tietê, este valor só é exigido quando há risco de mortandade de peixes a jusante. Além disso, nos registros das vazões defluentes ao reservatório, podem ser encontrados vários valores abaixo da vazão ecológica.

Desta forma, pode se seguir à modelagem matemática do sistema.

5.2.2 - Descrição do Problema de Programação Linear

A partir do balanço hídrico no reservatório (figura 15), parte-se para a elaboração do problema de programação linear.

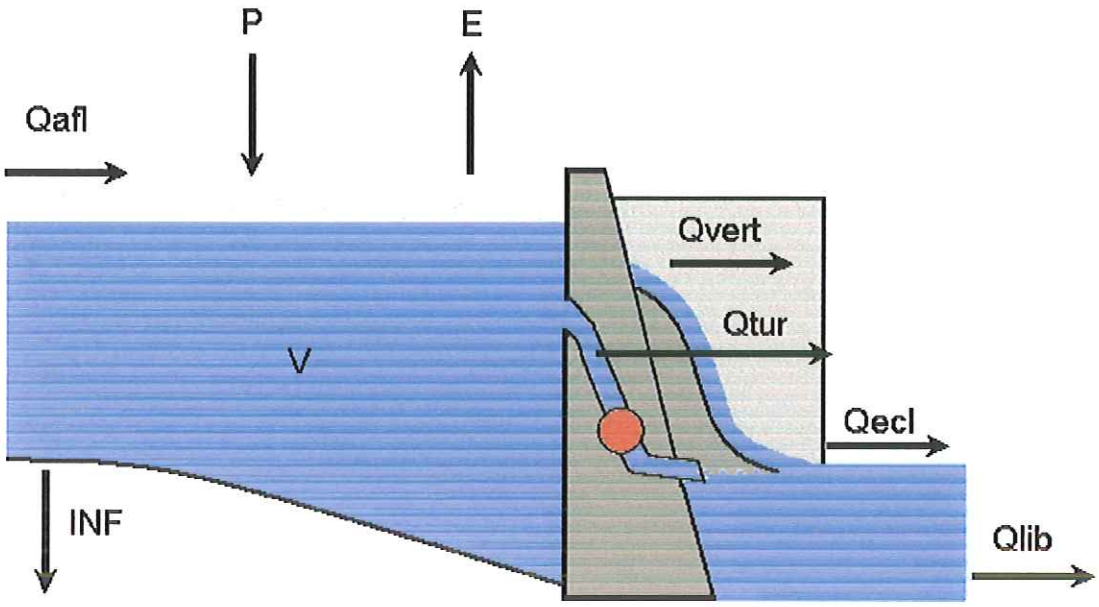


FIGURA 15 - Balanço hídrico no reservatório

A função objetivo do problema foi obtida através da equação da continuidade:

$$I - O = \frac{\Delta V}{\Delta t} \tag{11}$$

onde:

$$I = \frac{P}{\Delta t} + Q_{afl} \tag{12}$$

[16] De acordo com a tabela de vazões turbinadas em cada unidade geradora em função da

sendo:

I = afluências no sistema;
P = precipitação sobre o reservatório;
Q_{afl} = vazões afluentes ao reservatório.

e:

$$O = Q_{turb} + Q_{vert} + Q_{ecl} + \frac{E}{\Delta t} + \frac{INF}{\Delta t} \quad (13)$$

sendo:

O = defluências no sistema;
Q_{turb} = vazão turbinada;
Q_{vert} = vazão vertida;
Q_{ecl} = vazão de eclusagens;
E = evaporação;
INF = infiltração.

e:

$\Delta V = V_{t+1}$ (volume no final do período) - V_t (volume no início do período);
Δt = período ou intervalo de tempo.

Foi feita uma simplificação, onde se considera que o volume precipitado sobre o reservatório é igual ao volume evaporado do mesmo, pois os valores são bastante próximos. A infiltração foi desprezada por falta de informações precisas. O problema, portanto, fica da seguinte forma:

$$Q_{afl} - Q_{turb} - Q_{vert} - Q_{ecl} = \frac{(V_{t+1} - V_t)}{\Delta t} \quad (14)$$

---

queda bruta e da potência média gerada, documento interno da AES Tietê.

Isolando o termo Q_{tur}:

$$Q_{tur} = Q_{afl} + \frac{V_t}{\Delta t} - Q_{turb} - Q_{vert} - Q_{ecl} - \frac{V_{t+1}}{\Delta t} \quad (15)$$

O problema de programação linear fica, portanto, da seguinte forma:

$$MaxQ_{tur} = Q_{afl} + \frac{V_t}{\Delta t} - Q_{turb} - Q_{vert} - Q_{ecl} - \frac{V_{t+1}}{\Delta t} \quad (16)$$

Sujeito a:

$$V_{t+1} \leq 2566 \text{ hm}^3 \quad (17)$$

$$V_{t+1} \geq 1800 \text{ hm}^3 \quad (18)$$

$$V_{t+1} \geq 0{,}8 \cdot V_t \quad (19)$$

$$Q_{turb} \leq 780 \text{ m}^3/\text{s} \quad (20)$$

$$Q_{turb} \geq 10 \text{ m}^3/\text{s} \quad (21)$$

$$Q_{vert} \leq 4530 \text{ m}^3/\text{s} \quad (22)$$

$$Q_{vert} \geq 0 \quad (23)$$

$$Q_{lib} = Q_{turb} + Q_{vert} + Q_{ecl} \leq 2000 \text{ m}^3/\text{s} \quad (24)$$

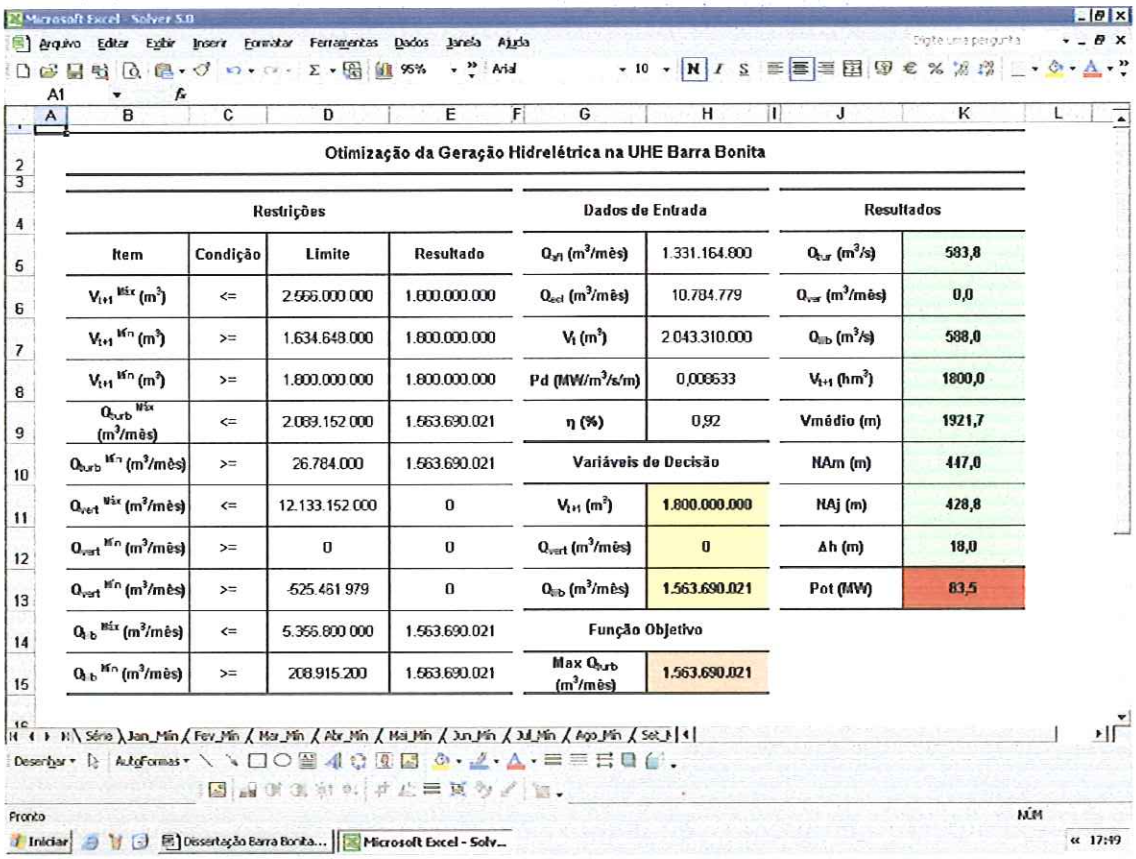
$$Q_{lib} = Q_{turb} + Q_{vert} + Q_{ecl} \geq 78 \text{ m}^3/\text{s} \quad (25)$$

O problema foi resolvido através do pacote de programação linear Solver do Excel, o qual utiliza o método simplex de otimização, descrito em BARBOSA (1997).

5.2.3 - Utilização do Solver do Excel para a Resolução do Problema

A utilização do pacote de otimização Solver consiste na montagem de uma planilha (figura 16), onde constarão todas as variáveis possíveis, uma

célula onde se deseja exibir um valor a ser maximizado, minimizado ou a assumir determinado valor.



Otimização da Geração Hidrelétrica na UHE Barra Bonita

Restrições				Dados de Entrada		Resultados	
Item	Condição	Limite	Resultado	Q_{afl} (m^3/mês)	1.331.164.800	Q_{tur} (m^3/s)	583,8
$V_{t+1}^{Máx}$ (m^3)	<=	2.566.000.000	1.800.000.000	Q_{ecl} (m^3/mês)	10.784.779	Q_{ver} (m^3/mês)	0,0
$V_{t+1}^{Mín}$ (m^3)	>=	1.634.648.000	1.800.000.000	V_t (m^3)	2.043.310.000	Q_{lib} (m^3/s)	588,0
$V_{t+1}^{Mín}$ (m^3)	>=	1.800.000.000	1.800.000.000	Pd (MW/m^3/s/m)	0,008633	V_{t+1} (hm^3)	1800,0
$Q_{turb}^{Máx}$ (m^3/mês)	<=	2.089.152.000	1.563.690.021	η (%)	0,92	Vmédio (m)	1921,7
$Q_{turb}^{Mín}$ (m^3/mês)	>=	26.784.000	1.563.690.021	Variáveis de Decisão		NAm (m)	447,0
$Q_{vert}^{Máx}$ (m^3/mês)	<=	12.133.152.000	0	V_{t+1} (m^3)	1.800.000.000	NAj (m)	428,8
$Q_{vert}^{Mín}$ (m^3/mês)	>=	0	0	Q_{vert} (m^3/mês)	0	Δh (m)	18,0
$Q_{vert}^{Mín}$ (m^3/mês)	>=	-525.461.979	0	Q_{lib} (m^3/mês)	1.563.690.021	Pot (MW)	83,5
$Q_{lib}^{Máx}$ (m^3/mês)	<=	5.356.800.000	1.563.690.021	Função Objetivo			
$Q_{lib}^{Mín}$ (m^3/mês)	>=	208.915.200	1.563.690.021	Max Q_{turb} (m^3/mês)	1.563.690.021		

FIGURA 16 - Planilha elaborada para utilização do Solver

Os dados de entrada do problema serão as variáveis conhecidas, ou seja, Q_{afl}, Q_{ecl} e V_t.

As vazões afluentes (Q_{afl}) são aquelas referentes às vazões médias mensais nos anos de 1955 (muito seco), de 1935 (que pode ser considerado de vazões médias) e 1983 (muito chuvoso). Estes dados forsm extraídos da série histórica de vazões naturais, fornecida pelo ONS e referente à UHE Barra Bonita (anexo 1).

O volume inicial (V_t) no primeiro mês de cada horizonte de planejamento foi definido como o volume meta do mês de Janeiro de 2003, fornecido pela AES Tietê, que é de 60,56% do volume máximo do reservatório, ou seja, 2043,3 hm^3. Nos meses subseqüentes, o volume inicial será igual ao volume final referente ao mês anterior.

A vazão de eclusagem será constante e igual àquela definida pela equação 10, ou seja, 3,64 m^3/s.

O primeiro passo é definir a célula de destino, que será a célula que contém a função objetivo. conforme figura 17:

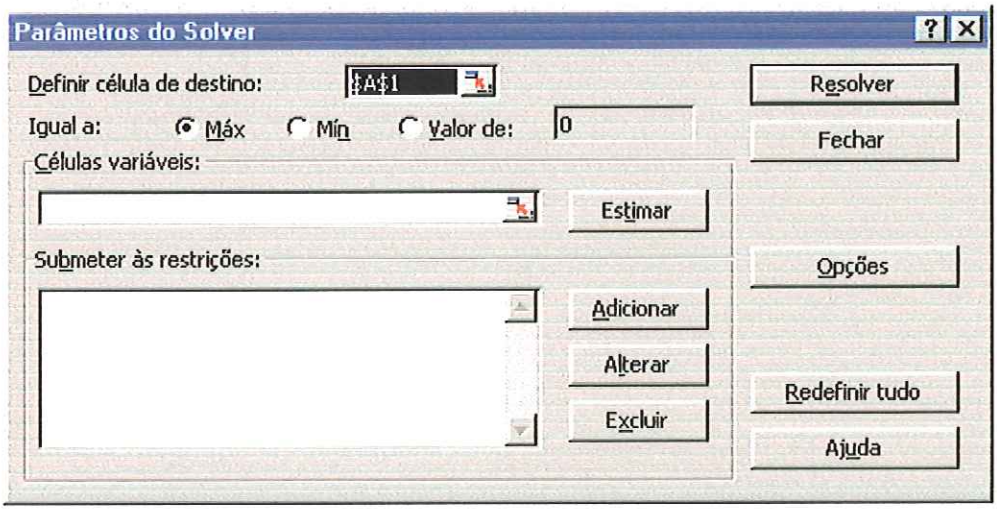


FIGURA 17 - Janela de entrada dos parâmetros do Solver

As células variáveis, ou seja, as quais o programa tentará a resolução assumindo os valores calculados, também deverão ser informadas no campo "células variáveis". As células variáveis podem ter algum valor já calculado ou encontrarem-se em branco. Neste caso, estas células serão aquelas referentes aos valores resultantes da solução do problema de otimização no período em questão, ou seja, a vazão turbinada (Q_{turb}), a vazão vertida (Q_{vert}) e o volume armazenado no final do período (V_{t+1}).

O próximo passo é a definição das restrições referentes ao modelo. O solver permite a alteração de algumas restrições, caso necessitem de modificações.

Depois de alteradas todas as restrições, o solver tentará efetuar os cálculos, podendo resolver ou não o problema exposto. Caso consiga resolvê-lo, apresentará a seguinte janela (figura 18):

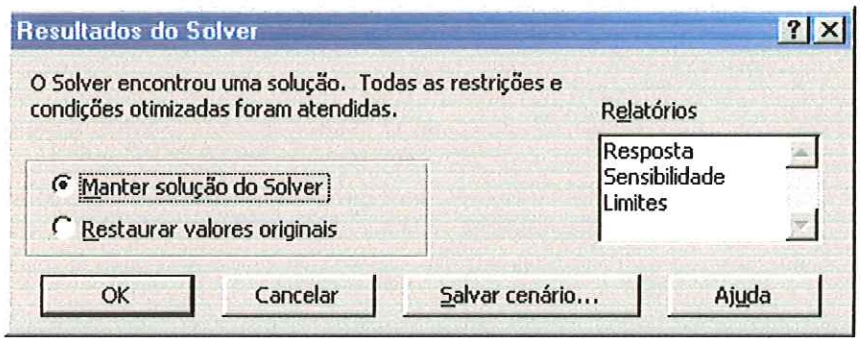


FIGURA 18 - Janela de resposta do Solver

O problema estará resolvido da melhor forma possível, obedecendo todas as restrições impostas. O solver poderá gerar os relatórios de respostas, onde serão descritos os detalhes da resolução.

5.2.4 - Determinação dos Valores Finais do Problema

Após a solução do problema de otimização pelo Solver, prossegue-se à analise dos resultados e à determinação da potência gerada no período. A potência é determinada através da seguinte expressão:

$$Pot = \Pr od_{esp} \cdot [(NA_{mon} - NA_{jus}) - hp] \cdot Q_{tur} \cdot \eta \qquad (26)$$

onde:

Pot = potência média gerada (MW)

$Prod_{esp}$ = Produtibilidade específica da UHE = 0,008633 $MW/m^3/s/m$[17]

NA_{mon} = nível d'água a montante da UHE (m)

NA_{jus} = nível d'água a jusante da UHE (m)

hp = perda de carga no sistema = 0,93% da altura bruta[18]

Q_{tur} = vazão turbinada (m^3/s)

η= rendimento global do sistema = 92%

[17] Informação fornecida pela AES Tietê

[18] Informação fornecida pela AES Tietê

O valor do nível d'água a montante da UHE (NA_{mon}) é obtido através do polinômio cota x volume do reservatório (figura 07) e do valor do volume médio no período:

$$NA_{mon} = -1{,}698 \cdot 10^{-13} \cdot V_{médio}{}^{4} + 1{,}76 \cdot 10^{-9} \cdot V_{médio}{}^{3} - 6{,}707 \cdot 10^{-6} \cdot V_{médio}{}^{2} + 1{,}496 \cdot 10^{-2} \cdot V_{médio} + 432{,}8 \quad (27)$$

onde:

$$V_{médio} = \frac{(V_t + V_{t+1})}{2} \quad (28)$$

Da mesma forma, o valor do nível d'água a jusante da UHE (NA_{jus}) é obtido através da vazão liberada (a soma entre a vazão turbinada e a vazão vertida) e o polinômio de jusante (figura 08):

$$NA_{jus} = 1{,}902 \cdot 10^{-13} \cdot Q_{lib}{}^{4} - 1{,}35 \cdot 10^{-9} \cdot Q_{lib}{}^{3} + 3{,}081 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{lib}{}^{2} - 8{,}052 \cdot 10^{4} \cdot Q_{lib} + 427{,}5 \quad (29)$$

onde:

$$Q_{lib} = Q_{turb} + Q_{vert} \quad (30)$$

Na imagem a seguir (foto 14), pode-se ver a leitura dos NAs pela UHE:

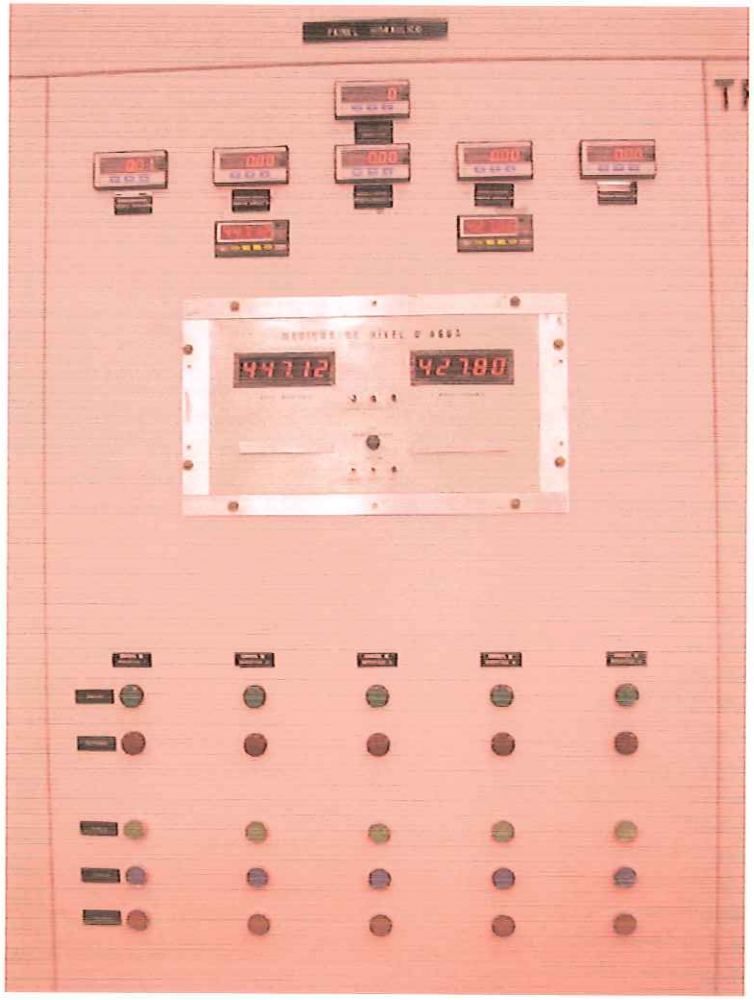


FOTO 14 - Medição de nível d'água na UHE Barra Bonita

Um resumo dos resultados pode ser visto na própria planilha do Solver (figura 19):

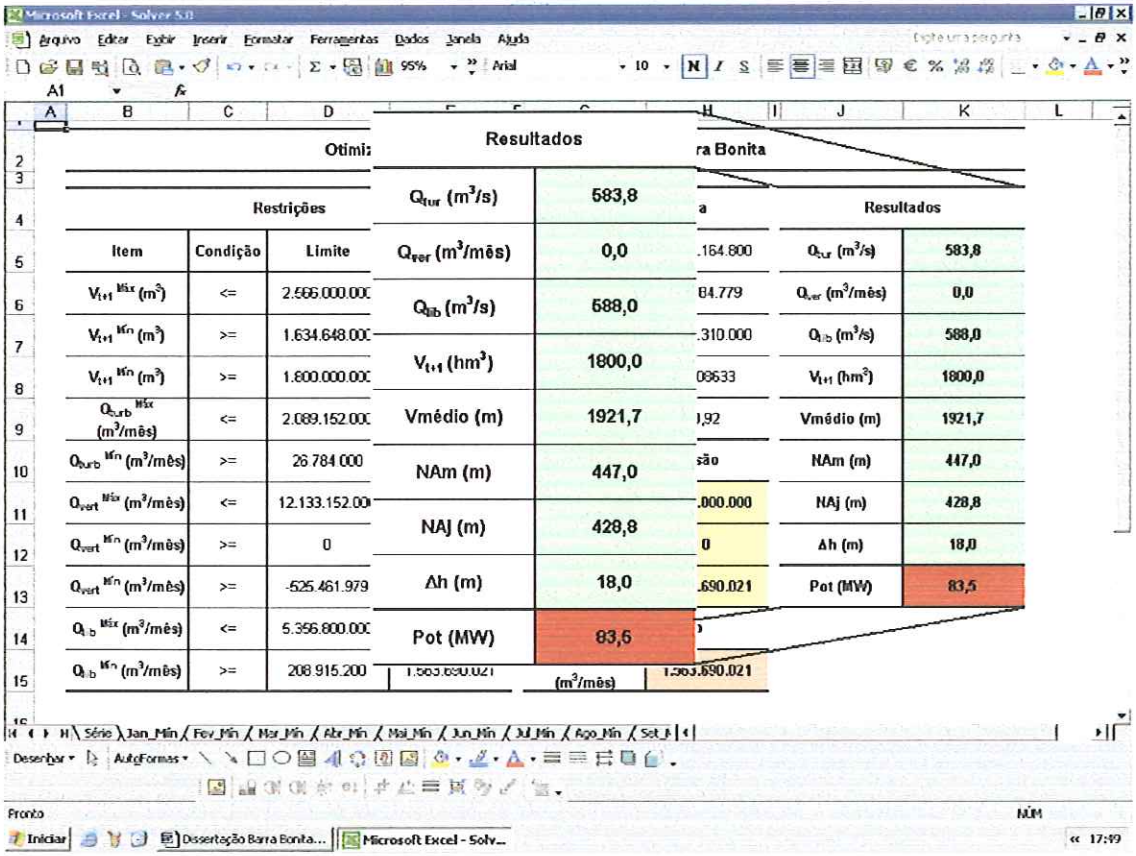


FIGURA 19 - Resultados finais do problema de otimização

Este procedimento é repetido para todos os meses de cada horizonte de planejamento e os resultados analisados serão a variação ao longo do tempo do armazenamento no reservatório, dos NAs no reservatório, das vazões turbinadas, das vazões liberadas e da potência gerada. Todas estas informações serão analisadas graficamente.

5.2.5 - Elaboração de Cartas de Decisão para a Operação da UHE

O produto final do problema de programação linear são 2 cartas de decisão, uma a nível mensal e outra a nível diário, que são gráficos onde, em função do volume atual do reservatório e da vazão afluente, é possível estimar um valor médio para a máxima vazão que poderá ser turbinada pela UHE em um determinado mês ou dia, sem que ocorra o comprometimento dos outros usos das águas do reservatório, principalmente a navegação.

Para a obtenção das cartas de decisão, foi adotado um volume inicial e uma vazão afluente para o reservatório e resolve-se o problema de

programação linear para esta situação. Em seguida, altera-se o valor da vazão afluente, mantendo-se o valor do volume inicial e resolve-se novamente o problema de programação linear para esta nova situação. Este procedimento é repetido, variando-se a vazão afluente de modo crescente, a partir de um valor mínimo, até que o valor da vazão turbinada atinja seu máximo, ou seja, 780 m^3/s.

Após esse procedimento, altera-se o valor do volume inicial e repete-se todo o processo.

5.3 - Aplicação de Simulação Computacional

Foi realizada simulação computacional do reservatório com o intuito de se determinar os índices de desempenho do sistema e os riscos a que o mesmo estaria submetido, contemplando diversos cenários de utilização. Foi analisado o uso das águas do reservatório para geração de energia e a navegação e a possibilidade da ocorrência de valores de vazões a jusante do reservatório abaixo da vazão ecológica e de ocorrência de enchentes na cidade de Barra Bonita. Para tal, será utilizado um modelo de rede de fluxo.

5.3.1 - Os Modelos de Rede de Fluxo

Os modelos de rede de fluxo representam sistemas de recursos hídricos por meio de uma rede constituída de nós e arcos. Os nós representam reservatórios, demandas, reversões, confluências, e outros pontos importantes de um sistema. Os arcos são os elos de ligação entre os nós e representam trechos de rios, adutoras, canais e outras estruturas semelhantes (PORTO, 1997).

Cada arco é caracterizado por três parâmetros, ou seja, os limites superior ($S_{i,j}$) e inferior ($l_{i,j}$) do fluxo que passa pelo arco (por exemplo, a capacidade máxima e mínima de um canal) e um custo ($C_{i,j}$) por unidade de fluxo que transita pelo arco. Os custos podem ser positivos ou negativos, ou seja, podem representar uma penalidade (no caso de custo positivo), ou um prêmio (custo negativo). Na figura 20, temos um exemplo de um sistema representado por uma rede de fluxo:

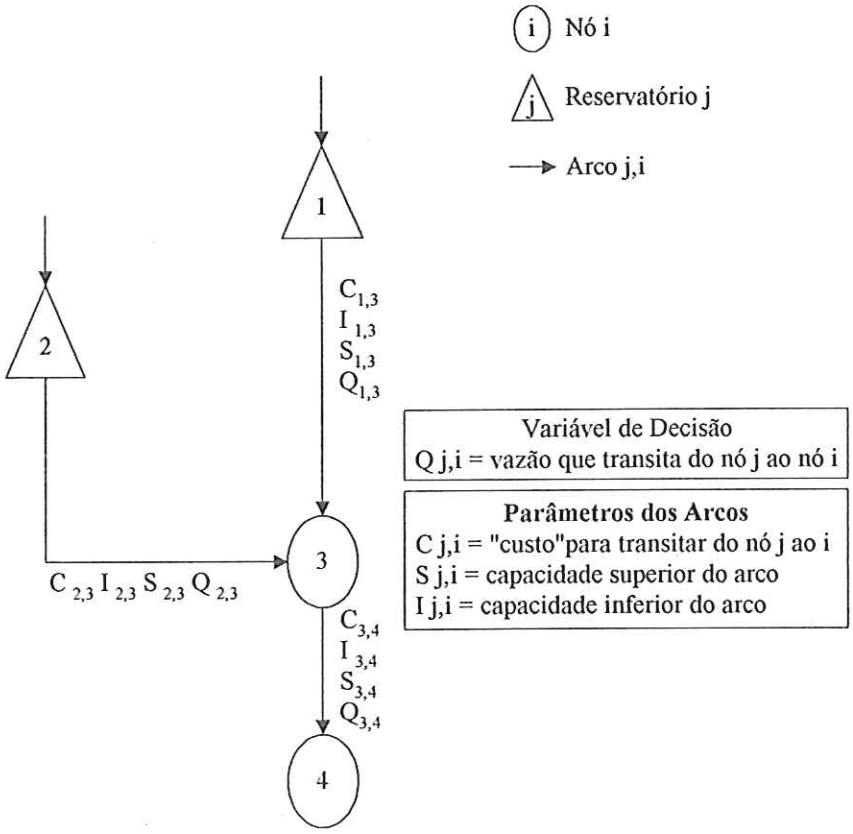


FIGURA 20 - Representação de um sistema como uma rede de fluxo

Fonte: LABADIE et al. (1999)

Este custo não significa, obrigatoriamente, um valor monetário, podendo representar preferências estabelecidas pelo usuário. As capacidades máxima e mínima de cada arco podem ser fixas para todo o período de simulação ou podem variar ao longo do tempo. O problema de otimização toma, portanto a forma:

$$\min \sum \sum C_{ji} \times Q_{ji} \tag{31}$$

sujeito a:

$$\sum Q_{ji} - \sum Q_{ji} = 0 \tag{32}$$

e

$$I_{ji} \leq Q_{ji} \leq S_{ji} \tag{33}$$

onde:

Q_{ji} = vazão que transita do nó "i" ao nó "j"
C_{ji} = custo (prioridade) da unidade de vazão que transita entre os nós "i" e "j"
N = número total de nós da rede
I_{ji} = limite inferior da vazão no arco "ji"
S_{ji} = limite superior da vazão no arco "ji"

A equação 31 é a função objetivo e representa o custo total da rede. A equação 32 estabelece que a rede deve ser totalmente conservativa (diz-se também totalmente circulante), ou seja, a soma das vazões afluentes ao nó "i" (ΣQ_{ij}) deve ser igual à soma dos fluxos que saem dele (ΣQ_{ki}). Esta é uma imposição do algoritmo que precisa ser obedecida incondicionalmente. A equação 33 representa o segundo tipo de restrição, ou seja, o valor da vazão em cada arco deve estar sempre na faixa limitada pelas capacidades mínimas e máximas do arco.

Cada nó deve conter as características da estrutura que representa. Por exemplo, se o nó "i" estiver representando um reservatório, o analista deve fornecer a relação cota-área-volume, os volumes máximos e mínimos de armazenamento, os níveis de armazenamento que se deseja atingir, o percentual de perdas por infiltração, a taxa de evaporação, etc.

Entre as características que tornam atrativa a utilização dessa classe de modelos para análise de sistemas de recursos hídricos, destacam-se as seguintes (AZEVEDO, PORTO e ZAHED, 1997):

- Na grande maioria dos casos pode-se representar um sistema de recursos hídricos de forma adequada, realista, flexível e bastante clara como uma rede composta de nós e arcos;
- Esses modelos possuem a flexibilidade típica dos modelos de simulação, ou seja, podem representar o comportamento de um sistema

de recursos hídricos de forma bastante completa;

- Os modelos de rede de fluxo incluem também algoritmos de otimização que minimizam o custo total da rede, ou seja, determinam os fluxos em todos os arcos de tal forma que a somatória de todos os custos seja mínima.

Os algoritmos de otimização de redes de fluxo costumam ser altamente eficientes, o que significa que sistemas extremamente grandes e complexos podem ser tratados em microcomputadores comuns.

Dado que o algoritmo admite apenas os dois tipos de restrições acima citados, e como os sistemas de recursos hídricos costumam ser altamente condicionados, em alguns casos pode haver necessidade de adoção de artifícios para que seja obtida representação adequada.

O modelo utilizado será o ACQUANET, também conhecido como MODSIM, por ser sua antiga denominação. O ACQUANET é classificado como um modelo de rede de fluxo, pois representa o sistema de aproveitamento dos recursos hídricos de uma bacia por meio de um conjunto de nós e arcos.

No ACQUANET, a otimização é executada a cada intervalo de tempo, de forma seqüencial, ou seja, não se garante o ótimo global para um período de "n" intervalos de tempo à frente. O intervalo mensal é usualmente o mais utilizado para os problemas de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, embora a técnica seja aplicável a intervalos mais curtos.

As perdas de condução em canais e evaporação em reservatórios representam um desvio da condicionante que impõe o balanço de massas. Tal fato não representa, entretanto, grande problema uma vez que estas perdas podem ser calculadas por processos iterativos sem grande perda de eficiência.

Em resumo, os modelos de rede de fluxo reúnem características das técnicas de simulação e otimização. As características de flexibilidade e adaptabilidade dos modelos de simulação são quase que integralmente preservadas nos MRF, ao mesmo tempo em que o algoritmo de otimização, apesar das limitações citadas, libera o usuário dos trabalhosos e demorados processos de tentativa e erro.

5.3.2 - O Modelo de Simulação ACQUANET

O ACQUANET surgiu através do modelo MODSIM, que é um modelo de rede de fluxo desenvolvido na Colorado State University sob a liderança do Prof. John Labadie (LABADIE, 1988 e AZEVEDO, PORTO e ZAHED FILHO, 1997). Influiu na escolha o fato de o ACQUANET ser um modelo generalizado, bem documentado, adaptado para simular as situações mais comuns que ocorrem em sistemas de recursos hídricos e testado em uma variedade de situações. A interface do ACQUANET pode ser vista na figura 21:

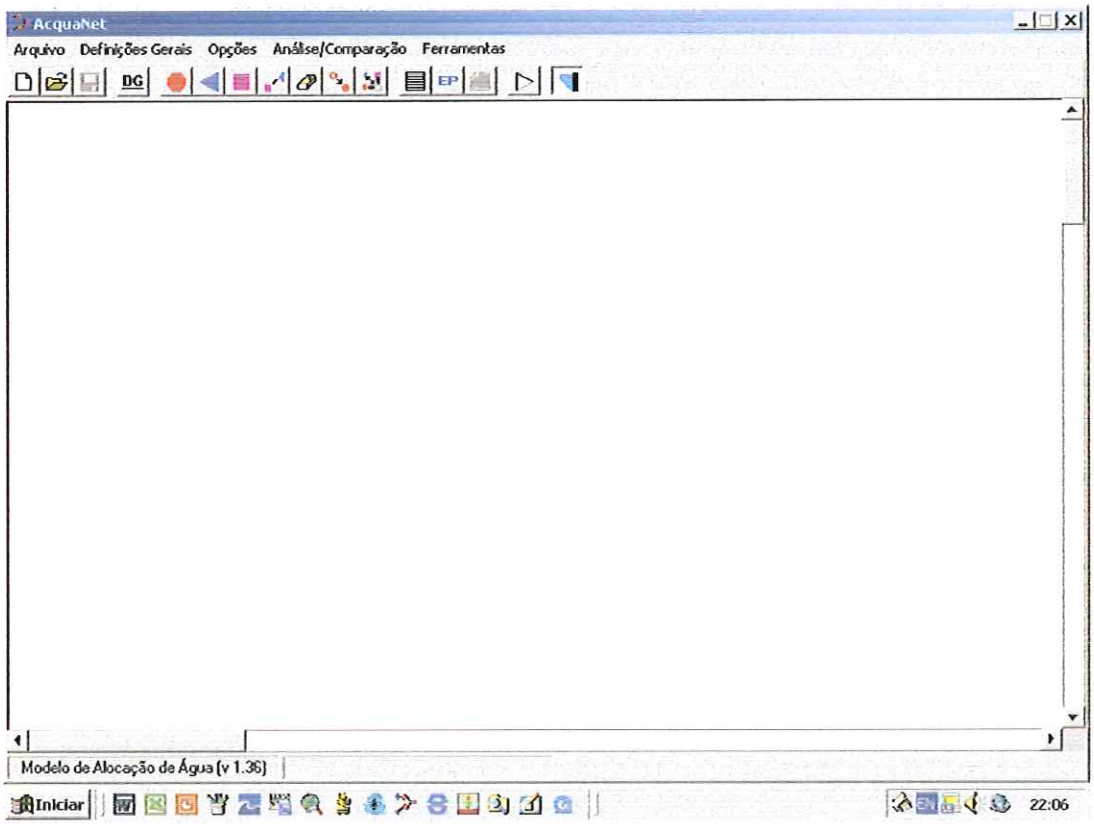


FIGURA 21 - Interface do ACQUANET

Uma das principais características do ACQUANET é o fato de que o modelo incorpora automaticamente uma série de funções que são comuns na simulação de bacias hidrográficas sem que o usuário tenha que se preocupar em programá-las. Entre as funções que o ACQUANET incorpora, as mais importantes são:

- Os usuários podem colocar quantos nós de demanda forem necessários para levar em conta as demandas na bacia (consuntivas ou não). O modelo atenderá a estas demandas de acordo com um valor de prioridade atribuída pelo usuário, que pode variar de 1 a 99 (o valor 1 é a maior prioridade). Na realidade as prioridades P e os custos C estão relacionados de forma biunívoca (C = 10P - 1000), o que significa que os valores de C que representam prioridades são sempre negativos. Portanto, ao atender uma prioridade o modelo estará diminuindo os custos da rede de um valor C por unidade de vazão fornecida.
- A operação dos reservatórios é feita utilizando-se o conceito de volume meta ou nível meta, ao qual se atribui uma prioridade. Desta forma sempre que o volume armazenado for menor que o volume meta, o reservatório guardará água desde que as outras prioridades da rede sejam menores. O volume armazenado acima do nível meta tem custo zero, ou seja é livre para atender a quaisquer demandas por menores que sejam suas prioridades.
- As perdas por evaporação dos reservatórios são levadas em conta por meio de processo iterativo.

A experiência no Brasil e no exterior tem mostrado que esta metodologia pode ser uma poderosa ferramenta para a análise de sistemas complexos de recursos hídricos. Não se pode esquecer, entretanto, que se trata apenas de uma ferramenta, como ocorre com qualquer outro modelo matemático. A qualidade dos resultados obtidos dependerá sempre da existência de uma série de condições, entre as quais, a qualidade e quantidade dos dados disponíveis, a adequação do modelo ao problema particular que se deseja analisar e a experiência do usuário para analisar os resultados e chegar a conclusões significativas sobre o comportamento do sistema. Em especial, é muito importante que o usuário tenha conhecimentos sólidos sobre os fundamentos teóricos do modelo, as limitações inerentes à metodologia, as hipóteses simplificadoras adotadas, e a forma de funcionamento do modelo (ROBERTO e PORTO, 1999).

5.3.2.1 - Tipos de Simulação

5.3.2.1.1 - Simulação Contínua

Na Simulação Contínua, o valor mais importante é o número total de anos de simulação (NT). O usuário deve fornecer séries de vazões afluentes mensais com duração igual à NT. O Modelo ACQUANET irá efetuar os cálculos continuamente, para todos os NT anos existentes. Ao final do cálculo, os resultados serão fornecidos mensalmente para todos os anos.

A simulação é dita contínua porque o modelo executa os cálculos da

- No segundo período parte-se novamente dos mesmos volumes iniciais anteriormente fornecidos e simula-se o período que vai do Ano 2 ao Ano 6;
- O procedimento acima é repetido até que seja efetuado o cálculo partindo-se do ano (NT - NH + 1);
- Os resultados obtidos são apresentados forma de curvas de freqüência para todos os meses do horizonte de simulação.

Como este módulo encontra-se em fase de desenvolvimento, não foi possível ter acesso a maiores detalhes sobre seu funcionamento.

Esta opção de cálculo é a mais recomendada quando o objetivo é fazer o planejamento e/ou a operação de sistemas de reservatórios.

5.3.3 - Descrição da Metodologia de Simulação

Os dados de entrada no modelo são as séries de vazões afluentes ao sistema, as características físicas do reservatório (volumes mínimo e meta, curvas cota x área x volume e prioridade), limites mínimos e máximos nos links e as demandas (valores, prioridades de atendimento e nós de retorno, quando existentes). O diagrama unifilar, que representa o sistema físico a ser analisado, ficará da seguinte forma (figura 22):

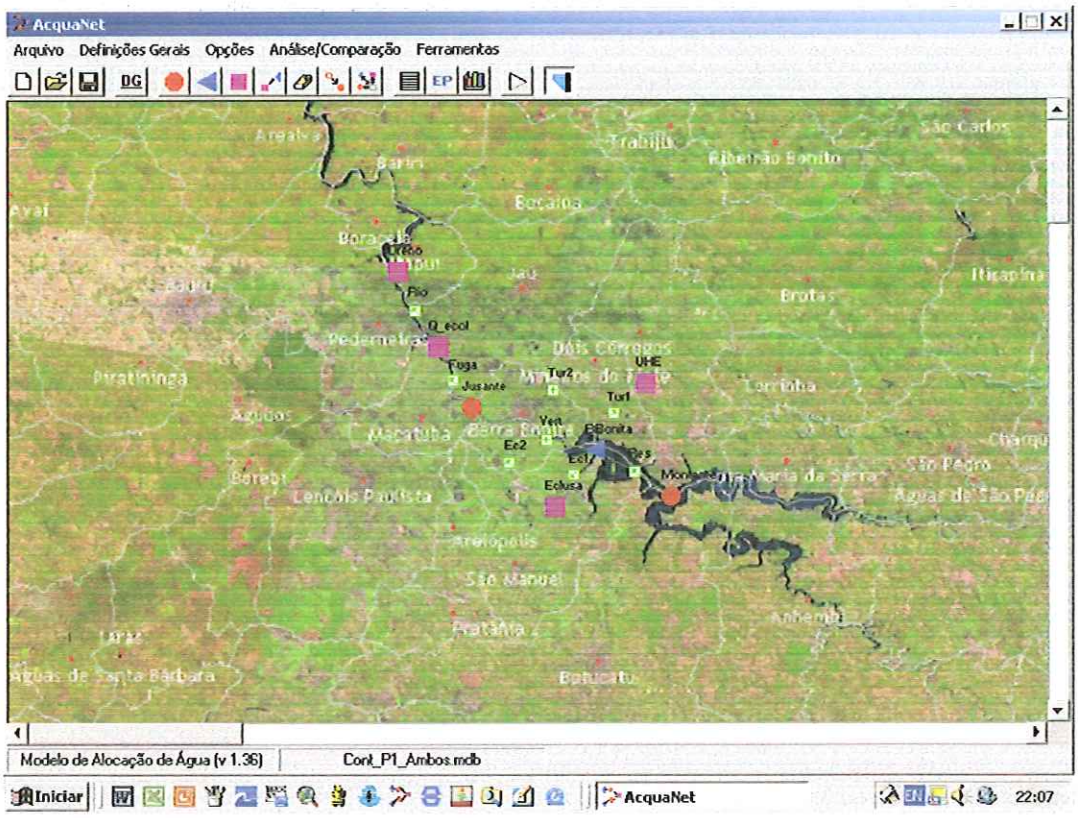


FIGURA 22 - Diagrama unifilar com imagem de fundo

A primeira tarefa é entrar com as Definições Gerais do problema no modelo, conforme figura 23. Nesta primeira etapa, deve se escolher como tipo de simulação a "Simulação Contínua" e como opção de cálculo a "Calibração". Para a realização da simulação, serão utilizados os dados de vazões médias mensais naturais no período de 1931 a 2001, fornecidas pelo ONS e referentes ao Reservatório de Barra Bonita. Desta forma, o número total de anos de simulação é de 71, o ano inicial de simulação é 1931 e o mês inicial da simulação é Janeiro.

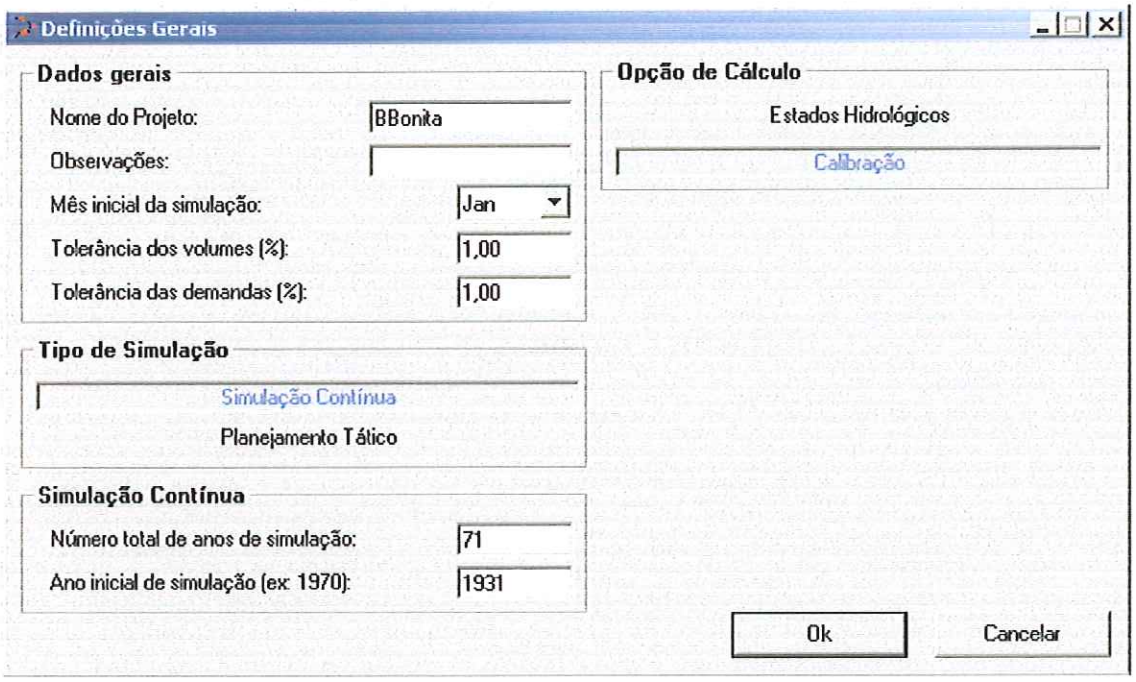
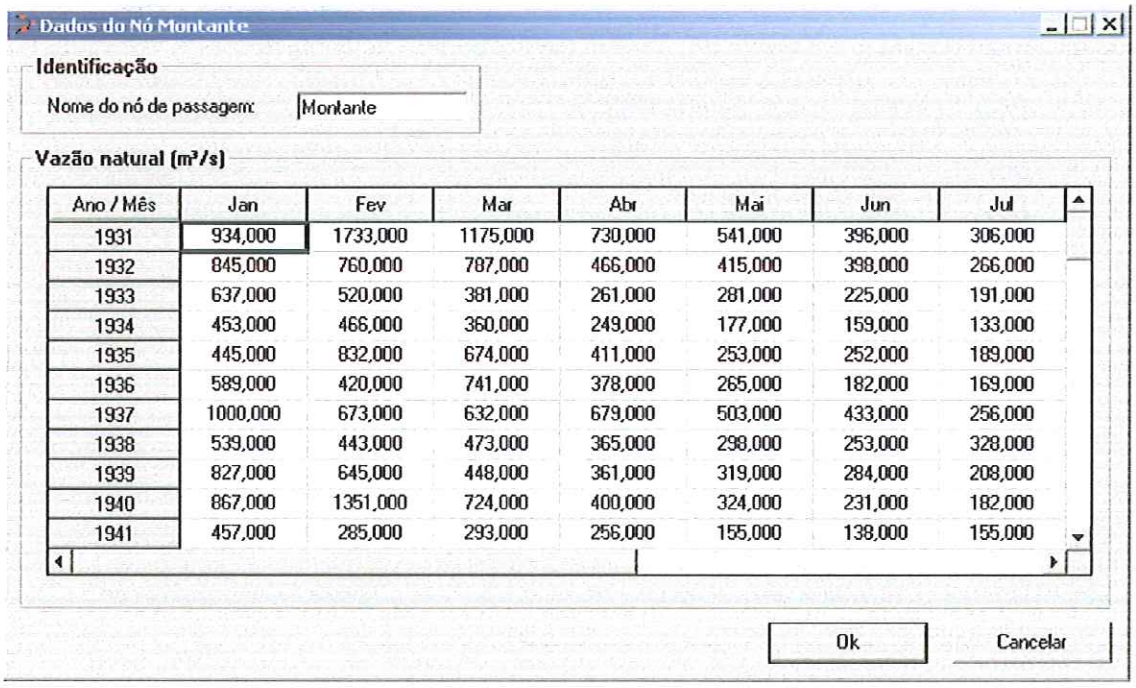


FIGURA 23 - Tela de entrada das definições gerais para Simulação Contínua

Em primeiro lugar, os dados da série de vazões naturais são inseridos no primeiro nó de passagem, representando as vazões afluentes ao sistema, conforme figura 24:



Ano / Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
1931	934,000	1733,000	1175,000	730,000	541,000	396,000	306,000
1932	845,000	760,000	787,000	466,000	415,000	398,000	266,000
1933	637,000	520,000	381,000	261,000	281,000	225,000	191,000
1934	453,000	466,000	360,000	249,000	177,000	159,000	133,000
1935	445,000	832,000	674,000	411,000	253,000	252,000	189,000
1936	589,000	420,000	741,000	378,000	265,000	182,000	169,000
1937	1000,000	673,000	632,000	679,000	503,000	433,000	256,000
1938	539,000	443,000	473,000	365,000	298,000	253,000	328,000
1939	827,000	645,000	448,000	361,000	319,000	284,000	208,000
1940	867,000	1351,000	724,000	400,000	324,000	231,000	182,000
1941	457,000	285,000	293,000	256,000	155,000	138,000	155,000

FIGURA 24 - Inserção da série de vazões médias mensais

Em seguida, deve-se entrar com as características físicas do reservatório no modelo, ou seja, os volumes característicos[19] (tabela 13):

TABELA 13 - Volumes Característicos

Volumes Característicos do Reservatório	
Volume Mínimo (hm^3)	576,6
Volume Máximo (hm^3)	3374
Volume Inicial (hm^3)	2566

e as curvas cota x área x volume (ver figuras 06 e 07).

O volume mínimo é referente ao NA mínimo no reservatório, que é de 439,5 metros. O volume inicial foi considerado como sendo o volume útil do reservatório. Por razões ligadas à interface da entrada dos dados das características físicas do reservatório, as curvas cota x área x volume tiveram que ser divididas em trechos, como pode ser visto na figura 25:

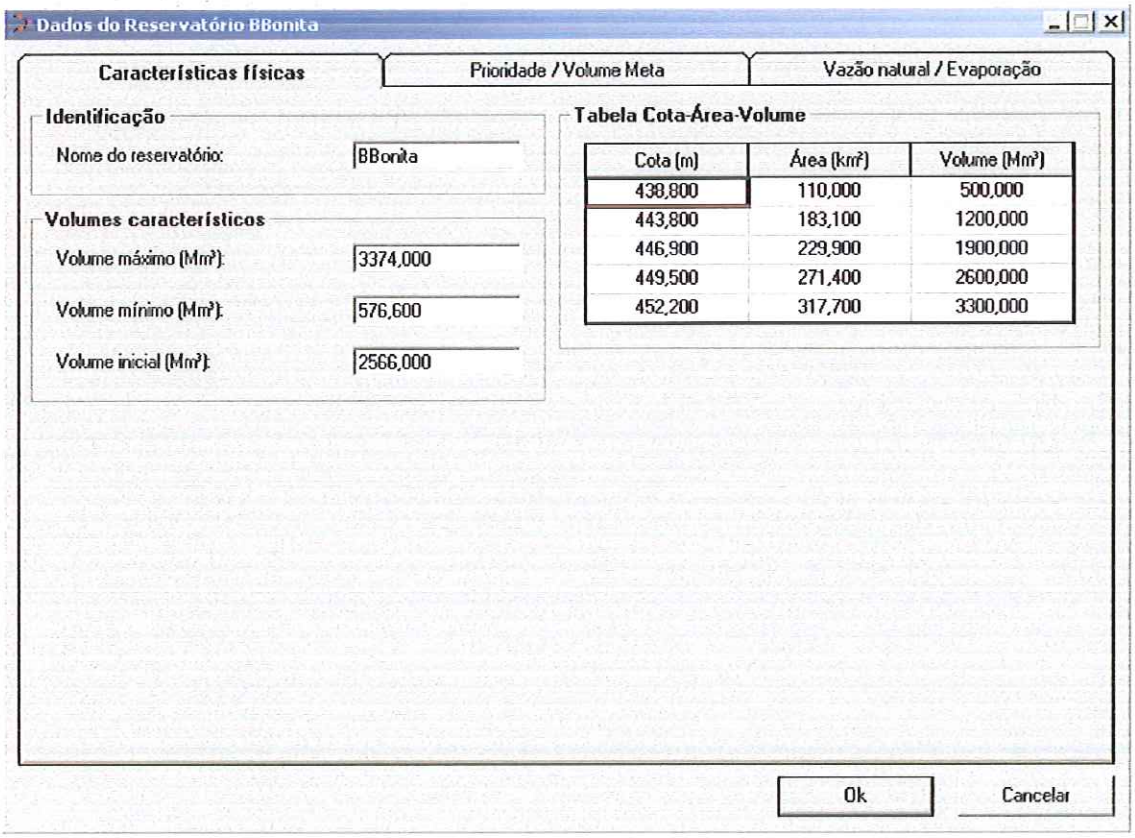


FIGURA 25 - Entrada das características físicas do reservatório

[19] Informação fornecida pela AES Tietê

Em seguida, entra-se com as prioridades de armazenamento e os volumes meta do reservatório (figura 26). As prioridades variam conforme cada cenário e serão discutidas logo adiante. Os volumes meta (tabela 14) foram definidos como as metas de armazenamento no reservatório no último ano, fornecidas pela AES Tietê (ver figura 14):

TABELA 14 - Metas de armazenamento no último ano no reservatório

Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Volume Armazenado Médio (% VU)	79,63%	85,13%	90,85%	95,50%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	76,10%
Volume Útil (% VT)	76,05%	76,05%	76,05%	76,05%	76,05%	76,05%	76,05%	76,05%	76,05%	76,05%	76,05%	76,05%
Volume Meta (% VT)	0,61	0,65	0,69	0,73	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,58

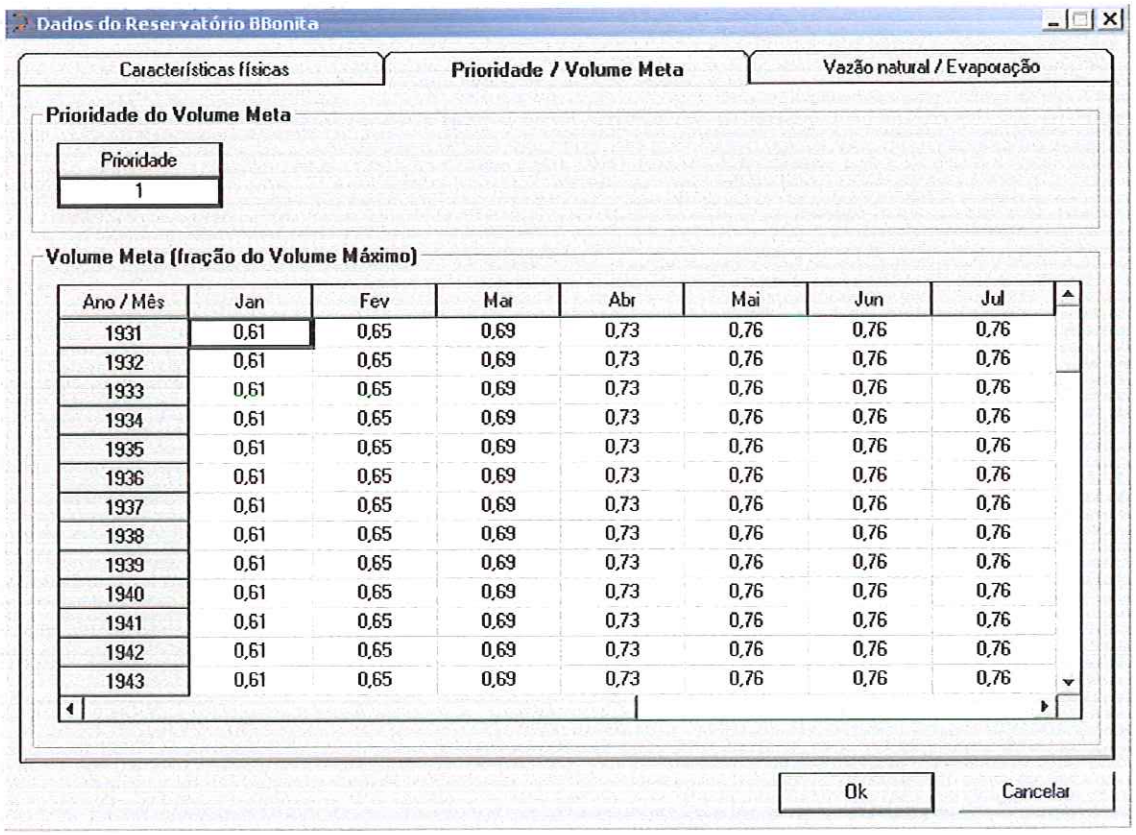
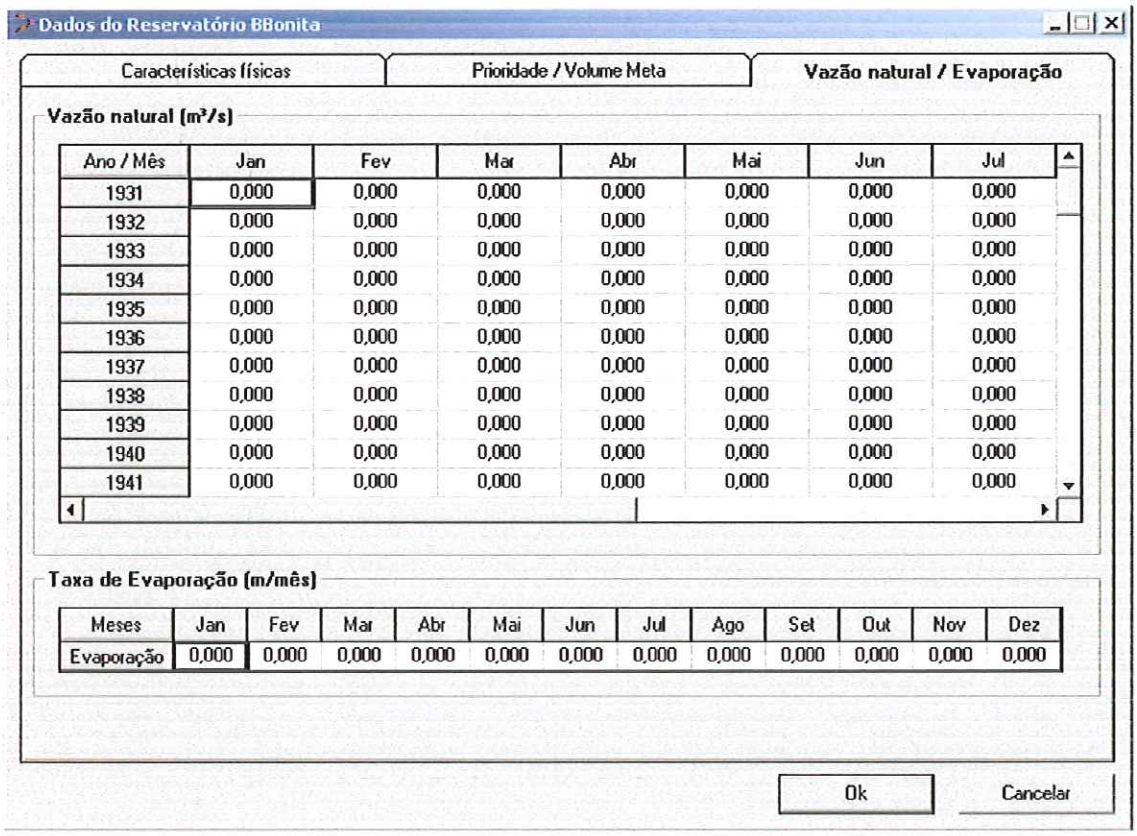


FIGURA 26 - Entrada dos dados de prioridade de armazenamento e volume meta do reservatório

Pode se entrar com valores de vazões naturais, quando estas são afluentes diretamente ao reservatório, o que não é o caso. Também é possível considerar na simulação a evaporação no reservatório (figura 27):



Ano / Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
1931	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1932	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1933	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1934	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1935	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1936	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1937	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1938	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1939	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1940	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1941	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Evaporação	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

FIGURA 27 - Entrada dos dados vazão natural e taxa de evaporação no reservatório

Também neste caso, foi feita uma simplificação, onde se considera que o volume precipitado sobre o reservatório é igual ao volume evaporado do mesmo, pois estes apresentam valores bastante próximos.

Parte-se agora para a entrada de dados das demandas, ou seja, os valores ao longo do período de simulação, conforme figura 28.

Recomenda-se colocar uma demanda fictícia no final da rede de fluxo, também conhecida como dreno. Normalmente, o valor desta demanda é muito alto a sua prioridade muito baixa. Este procedimento é introduzido no modelo para evitar que vazões extravasadas muito grandes eventualmente excedam a capacidade superior dos links, impedindo a solução através do algoritmo.

As demandas da eclusa, da vazão ecológica e do dreno terão valores constantes ao longo de toda a simulação (tabela 15):

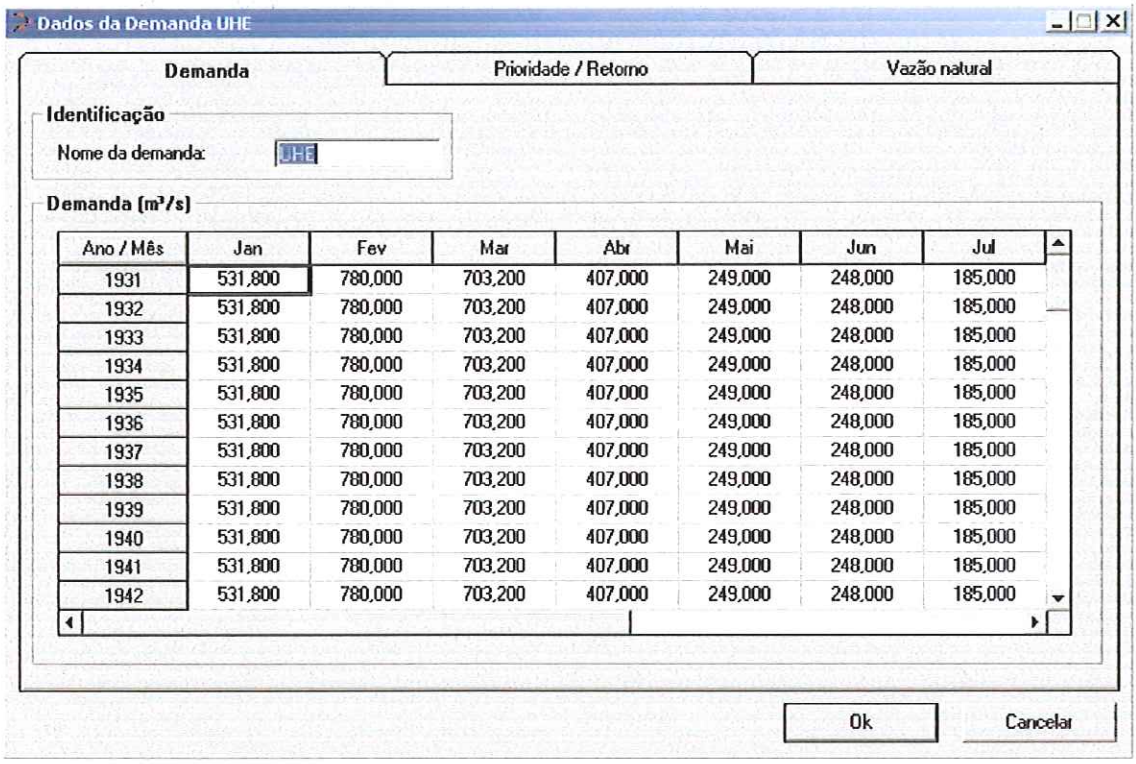
TABELA 15 - Demandas da eclusa, da manutenção da vazão ecológica e do dreno

Demanda	Valor (m^3/s)
Eclusa	3,64
Vazão Ecológica	160
Dreno	50.000

Já as demandas da UHE (tabela 16) terão valores mensais variáveis. Existe uma certa dificuldade de se definir essas demandas, pois estas são definidas diariamente pelo ONS de acordo com as necessidades de fornecimento de energia elétrica pelo SIN. Desta forma, as demandas da UHE foram definidas como sendo os resultados das vazões maximizadas no problema de programação linear, considerando as vazões médias (ano de 1935).

TABELA 16 - 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



Ano / Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
1931	531,800	780,000	703,200	407,000	249,000	248,000	185,000
1932	531,800	780,000	703,200	407,000	249,000	248,000	185,000
1933	531,800	780,000	703,200	407,000	249,000	248,000	185,000
1934	531,800	780,000	703,200	407,000	249,000	248,000	185,000
1935	531,800	780,000	703,200	407,000	249,000	248,000	185,000
1936	531,800	780,000	703,200	407,000	249,000	248,000	185,000
1937	531,800	780,000	703,200	407,000	249,000	248,000	185,000
1938	531,800	780,000	703,200	407,000	249,000	248,000	185,000
1939	531,800	780,000	703,200	407,000	249,000	248,000	185,000
1940	531,800	780,000	703,200	407,000	249,000	248,000	185,000
1941	531,800	780,000	703,200	407,000	249,000	248,000	185,000
1942	531,800	780,000	703,200	407,000	249,000	248,000	185,000

FIGURA 28 - Entrada dos valores de demandas ao longo do período simulado

Em seguida, entra-se com as prioridades de atendimento das demandas e os nós de retorno de cada uma destas (figura 29). Também aqui, as prioridades variam conforme cada cenário.

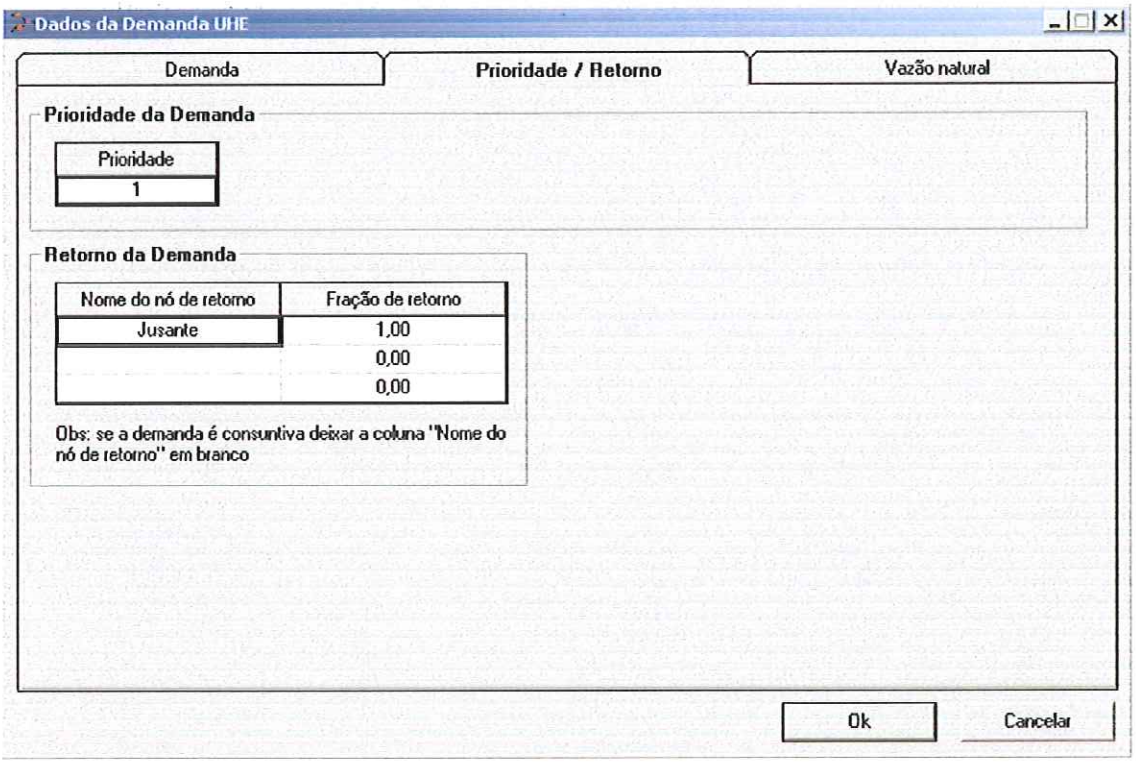


FIGURA 29 - Entrada dos dados de prioridade de atendimento e dos nós de retorno

Finalmente, deve-se limitar as vazões mínimas e máximas em cada link, conforme figura 30:

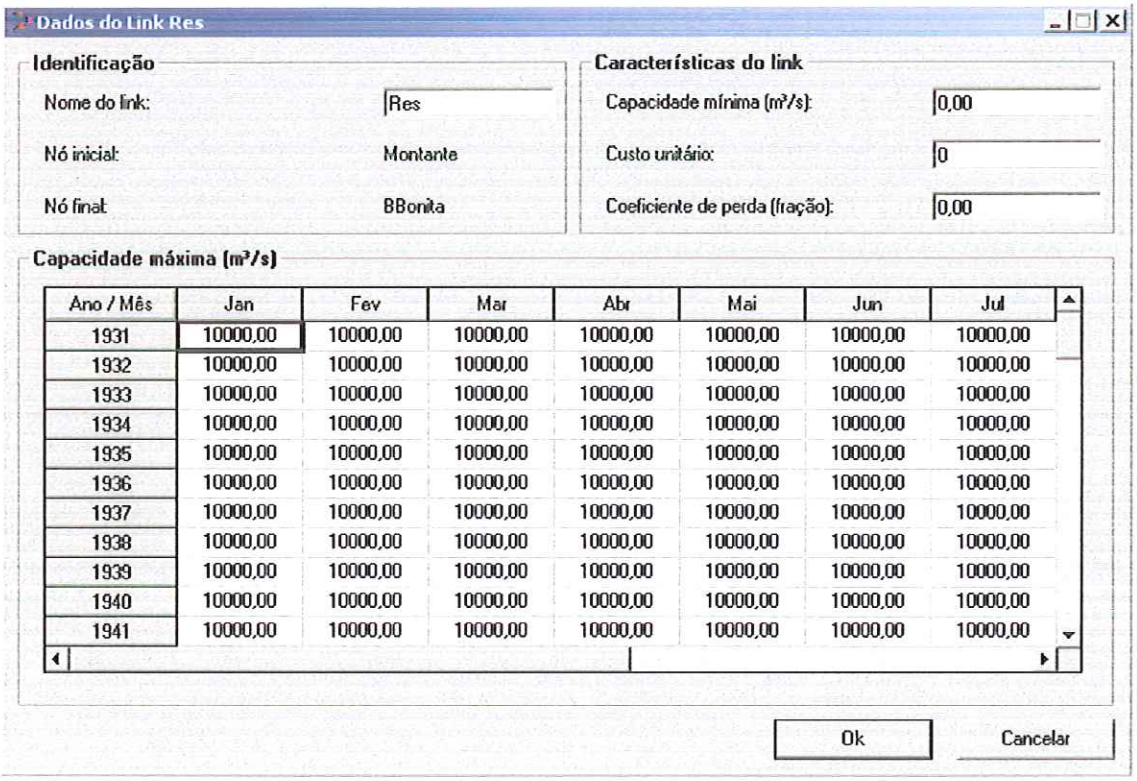


FIGURA 30 - Entrada dos limites mínimos e máximos em cada link

Terminado todo este procedimento, o problema de simulação estará pronto para ser resolvido (figura 31):

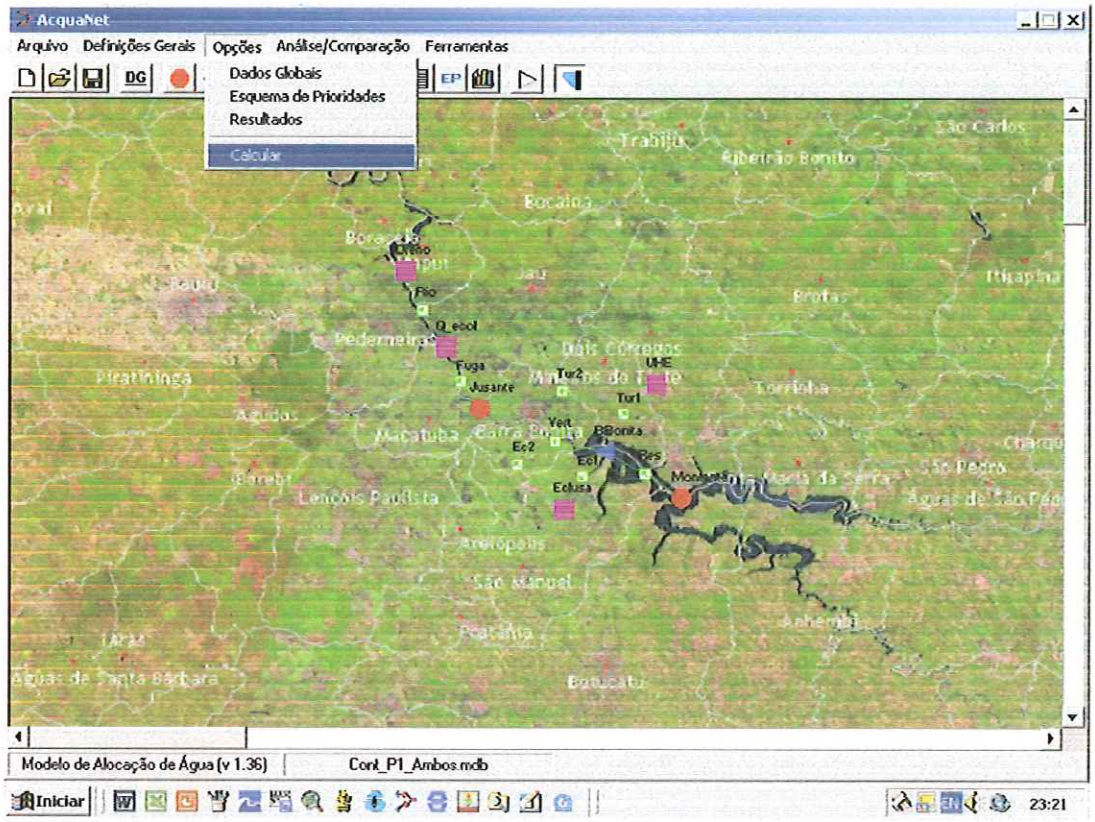


FIGURA 31 - Procedimento para a realização do cálculo do problema de simulação

e caso haja solução para o problema, surgirá a seguinte mensagem na tela (figura 32):

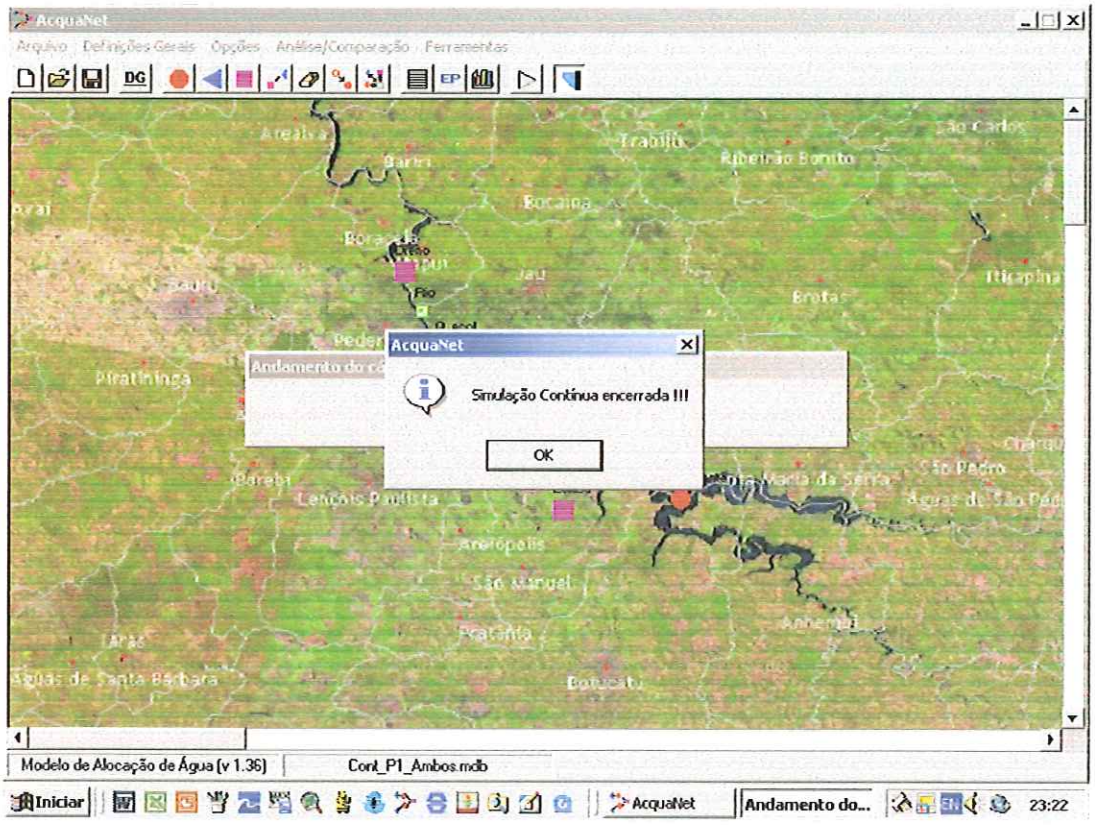


FIGURA 32 - Mensagem exibida no final da simulação

A simulação computacional do Reservatório de Barra Bonita foi dividida em 2 etapas.

Na primeira etapa, foi realizada a Simulação Contínua para verificar o comportamento do reservatório ao longo do período de simulação. Os cenários são os seguintes:

- Cenário 1: a navegação e a geração de energia 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.

Portanto, as prioridades ficam definidas em cada cenário da seguinte forma (tabela 17):

TABELA 17 - Prioridades em cada cenário

Demanda	UHE	Reservatório	Eclusa	Vazão Ecológica	Dreno
Cenário 1	1	1	1	3	99
Cenário 2	2	1	1	3	99
Cenário 3	1	2	2	3	99

Na segunda etapa, foram analisados os resultados de cada um dos cenários anteriores e, para o melhor deles, será feito o Planejamento Tático do reservatório, com a finalidade de se fornecer subsídios para o planejamento de sua operação.

Neste caso, algumas alterações foram feitas nas Definições Gerais (figura 33). Por razões óbvias, o tipo de simulação foi alterado para "Planejamento Tático". O horizonte de simulação será de 1 ano.

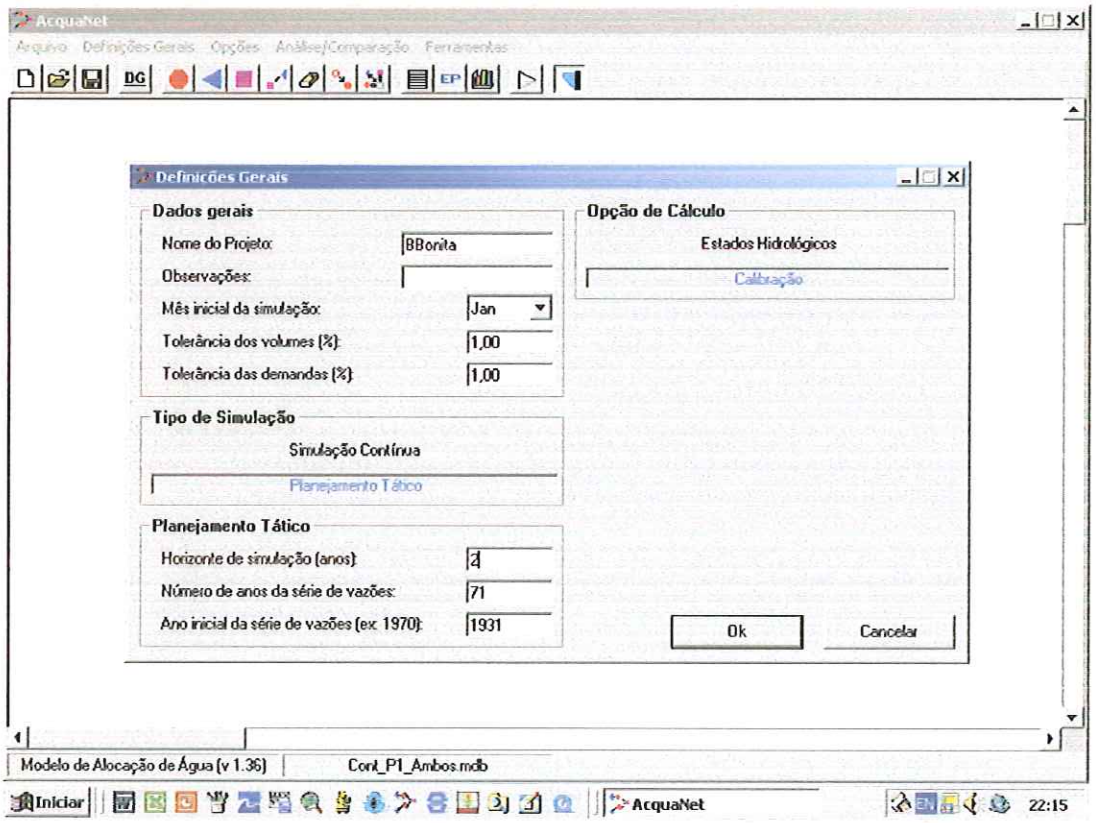


FIGURA 33 - Tela de entrada das definições gerais para Planejamento Tático

Em seguida, da mesma forma que no caso da Simulação Contínua, o problema está pronto para ser resolvido. O procedimento para cálculo e a mensagem final neste também são os mesmos.

5.3.4 - Forma de Apresentação dos Resultados

5.3.4.1 - Resultados da Simulação Contínua

Os resultados das simulações são apresentados em diversos formatos, mais especificamente gráficos e tabelas com o comportamento das variáveis de interesse ao longo do tempo. É possível também analisar os resultados de diferentes simulações na mesma tela para efeito de comparações (figuras 34, 35 e 36).

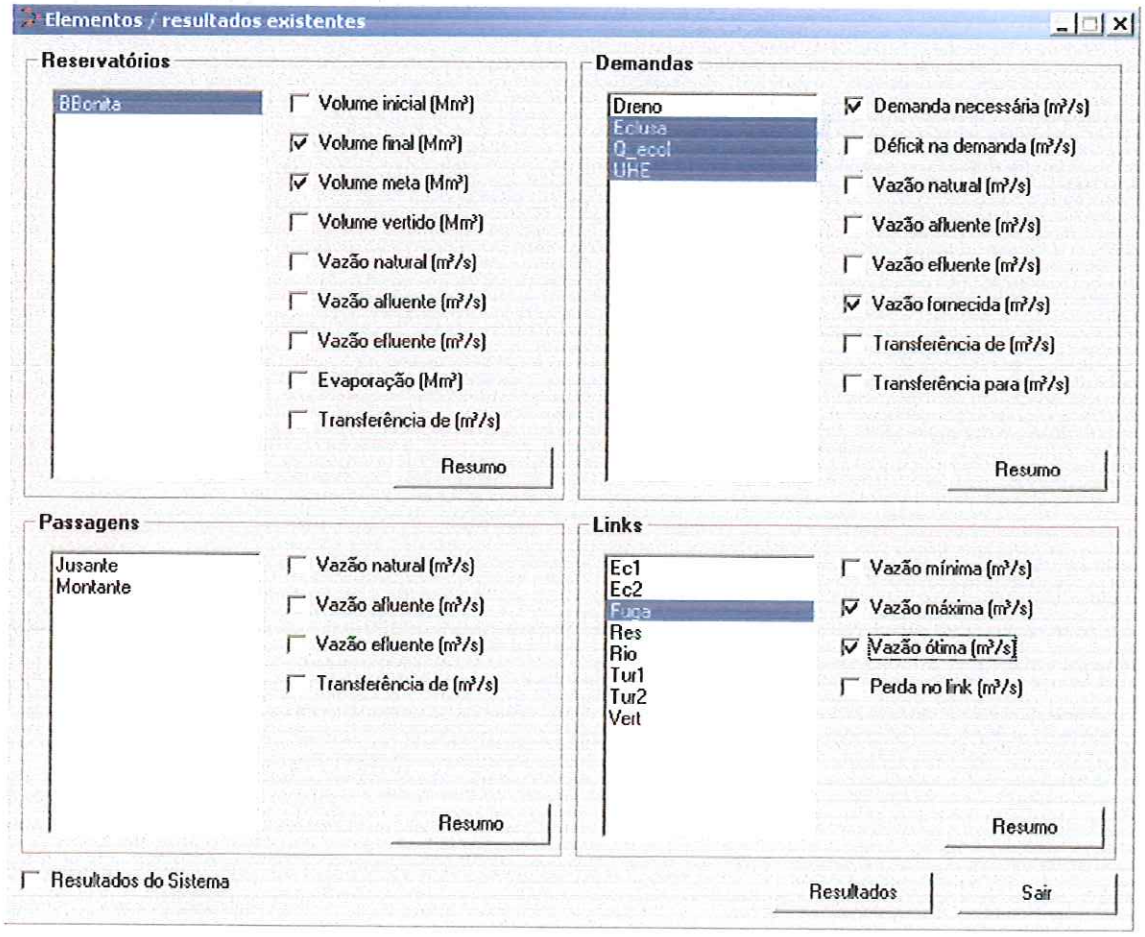


FIGURA 34 - Tela de seleção dos resultados a serem visualisados

Resultados

Mês/Ano	BBonita, Vfin (Mm³)	BBonita, Vmeta (Mm³)	Eclusa, Dem (m³/s)	Q_ecol, Dem (m³/s)	UHE, Dem (m³/s)	Eclusa, Qfornec (m³/s)	Q_ecol, Qfornec (m³/s)
Jan / 1931	2058,140	2058,140	3,640	160,000	531,800	3,640	1123,610
Fev / 1931	2193,100	2193,100	3,640	160,000	780,000	3,640	1677,210
Mar / 1931	2328,060	2328,060	3,640	160,000	703,200	3,640	1124,610
Abr / 1931	2463,020	2463,020	3,640	160,000	407,000	3,640	677,930
Mai / 1931	2564,240	2564,240	3,640	160,000	249,000	3,640	503,210
Jun / 1931	2564,240	2564,240	3,640	160,000	248,000	3,640	396,000
Jul / 1931	2564,240	2564,240	3,640	160,000	185,000	3,640	306,000
Ago / 1931	2564,240	2564,240	3,640	160,000	190,000	3,640	253,000
Set / 1931	2564,240	2564,240	3,640	160,000	319,000	3,640	366,000
Out / 1931	2564,240	2564,240	3,640	160,000	743,000	3,640	314,000
Nov / 1931	2564,240	2564,240	3,640	160,000	332,000	3,640	320,000
Dez / 1931	1956,920	1956,920	3,640	160,000	332,000	3,640	1046,750
Jan / 1932	2058,140	2058,140	3,640	160,000	531,800	3,640	807,210
Fev / 1932	2193,100	2193,100	3,640	160,000	780,000	3,640	704,210
Mar / 1932	2328,060	2328,060	3,640	160,000	703,200	3,640	736,610
Abr / 1932	2463,020	2463,020	3,640	160,000	407,000	3,640	413,930
Mai / 1932	2564,240	2564,240	3,640	160,000	249,000	3,640	377,210
Jun / 1932	2564,240	2564,240	3,640	160,000	248,000	3,640	398,000

Planilha | Gráfico | C. Permanência | Sair

FIGURA 35 - Resultados da simulação em formato de planilha

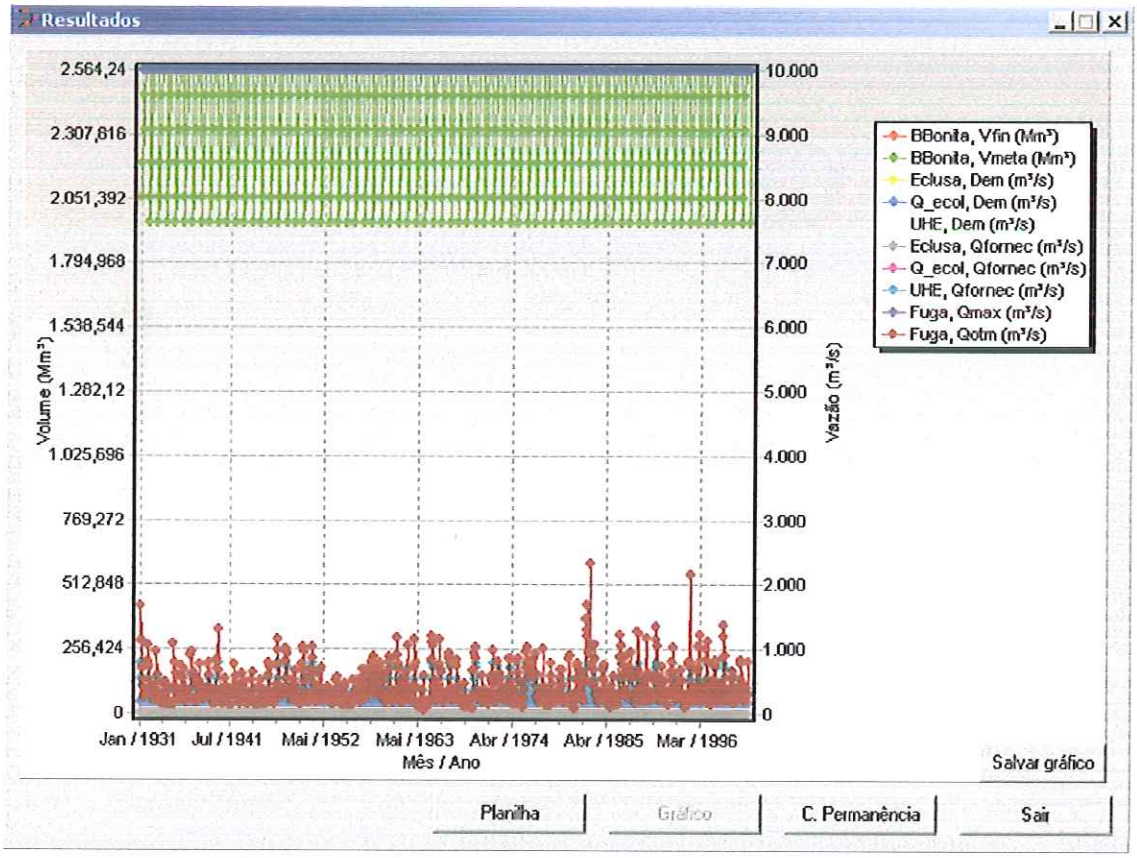


FIGURA 36 - Resultados da simulação em formato de gráfico

Através destes resultados, parte-se para a determinação dos índices de desempenho do sistema, através dos quais se pode ter uma ordem de grandeza das possíveis falhas pelas quais o reservatório possa se submeter ao longo do tempo.

5.3.4.1.1 - Índices de Desempenho

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.

Muitas 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; KJELDSEN e ROSBJERG, 2001).

HASHIMOTO et al. (1982) foram os pioneiros a introduzir estes índices de desempenho nesta área, embora conceitos similares de freqüência, magnitude e duração das falhas já tinham sido usados previamente para avaliar sistemas de abastecimento de água (FIERING, 1969).

Um sistema de recursos hídricos inclui "I" usuários e vários cenários futuros possíveis. A noção de usuários não é limitada para consumo humano, mas pode ser entendida por qualquer atividade econômica, social e ambiental que dependa da oferta de água do sistema em consideração. 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, nível de água, ou seja, o estado do sistema definido por um processo estocástico. As séries temporais das variáveis de desempenho podem ser obtidas através da simulação 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 possa separar valores satisfatórios (S) e não satisfatórios, ou falhas (F). Isto pode ser definido como:

$$S = \{X_t | X_t \geq X_0\}$$
$$F = \{X_t | X_t < X_0\} \tag{33}$$

Os resultados das simulações serão analisados estatisticamente através destes índices, que visam determinar a sustentabilidade relativa de sistemas hídricos e são definidos a seguir.

5.3.4.1.1.1 - Confiabilidade

Pode ser definida como a porcentagem do tempo em que as demandas necessárias foram atendidas ou como a probabilidade (P) de a variável em análise possuir valores satisfatórios. A confiabilidade (C) é um conceito largamente utilizado em planejamento de recursos hídricos e algumas vezes é assumida como o oposto do risco.

$$C = P\{X_t \in S\} = P\{X_t \geq X_0\} \tag{34}$$

Simplificadamente, a confiabilidade também pode ser definida como:

$$C = \frac{n\circ \text{ de valores simulados na zona satisfatória}}{n\circ \text{ de períodos simulados}} \tag{35}$$

5.3.4.1.1.2 - Resiliência

Descreve como um sistema recupera-se ou retorna de uma falha, uma vez que esta tenha ocorrido. HASHIMOTO et al. (1982) propuseram uma definição de probabilidade condicional.

$$R = \Pr\{X_{t+1} \in S | X_t \in F\} = \Pr\{X_{t+1} \geq X_0 | X_t < X_0\} \quad (36)$$

Simplificadamente, a resiliência também pode ser definida como:

$$R = \frac{n\circ \text{ de valores simulados na zona insatisfatória seguidos de valores satisfatórios}}{n\circ \text{ de períodos simulados na zona insatisfatória}} \quad (37)$$

5.3.4.1.1.3 - Vulnerabilidade

A vulnerabilidade mede a severidade das falhas a que o sistema está sujeito. A idéia deste índice é que se possa determinar quanto de água em média é necessário para suprir o sistema quando da ocorrência de períodos hidrológicos críticos.

A figura 37 representa a definição de duração (M) e déficit (s_j) da variável de estudo no período de falha.

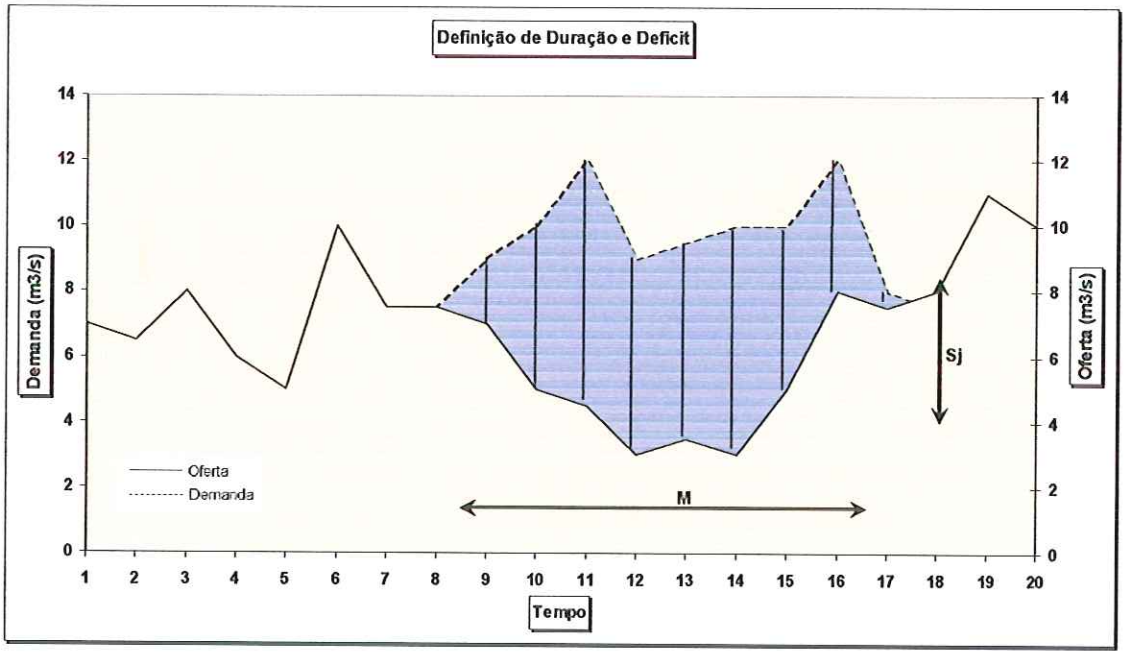


FIGURA 37 - Definição de duração e déficit de volume no período de falha do sistema

A vulnerabilidade é então definida pela equação:

$$V = \frac{\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} s_j}{Y} \tag{38}$$

onde:

M = período total da falha (número de intervalos de tempo onde ocorreram falhas);

s_j = valor da falha em cada intervalo de tempo;

Y = vazão, no caso de demandas, ou volume-meta, no caso de reservatórios.

Simplificadamente, a vulnerabilidade também pode ser definida como:

$$V = \frac{\frac{1}{n \circ de\ falhas}\sum déficit\ no\ \text{atendimento}}{Vazão\ (no\ caso\ de\ demandas)\ ou\ VolumeMeta\ (no\ caso\ de\ reservatórios)} \tag{39}$$

5.3.4.2 - Resultados do Planejamento Tático

No Planejamento Tático, os resultados também são apresentados em formatos de gráficos, tabelas, curvas de permanência e comportamento de variáveis de interesse ao longo do tempo. A seleção dos resultados a serem visualizados é feita através da seguinte tela (figura 38):

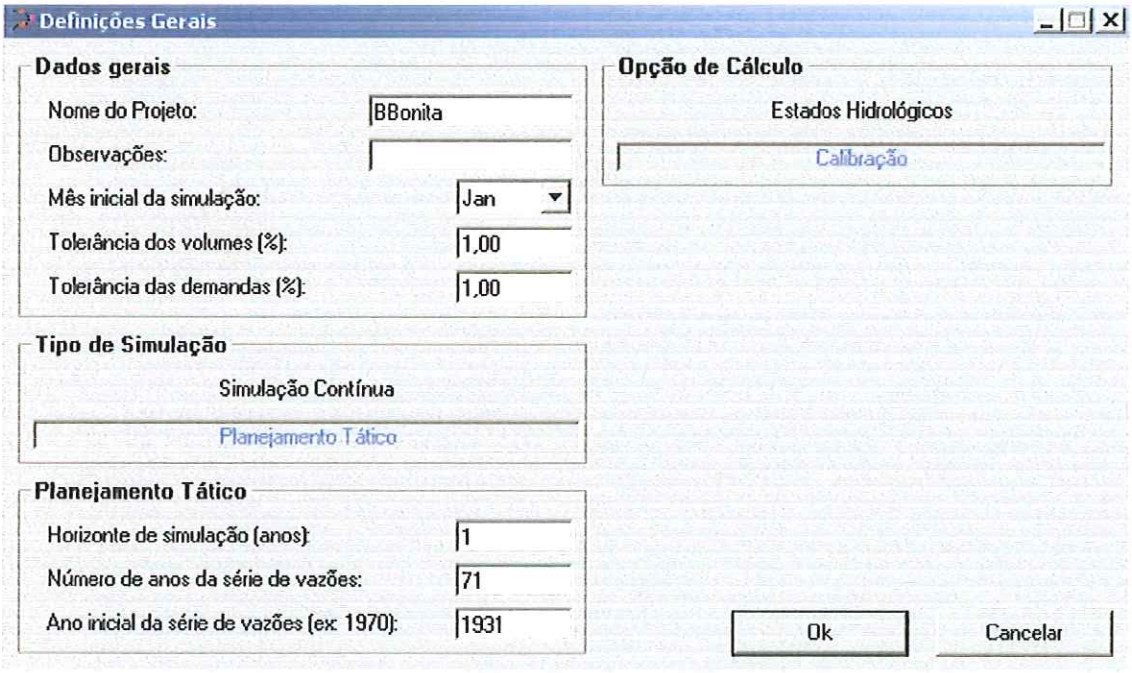


FIGURA 38 - Seleção de resultados a serem visualizados no Planejamento Tático

5.3.4.2.1 - Resultados do Reservatório

Os resultados do reservatório a serem analisados são:

- Probabilidade de estar cheio no final do mês: mostra, para todos os meses, qual a chance do reservatório atingir determinada percentagem de sua capacidade. Neste caso, será analisada a probabilidade do reservatório atingir no fim de cada mês a percentagem referente a seu volume útil, ou seja, 75,6% do volume total.

5.3.4.2.2 - Resultados das Demandas

Os resultados das demandas a serem analisados são:

- Falhas: apresenta, em formato de planilha ou gráfico, a probabilidade de ocorrência de falhas no mês, falhas no período e ao menos uma falha até o mês;

- Falhas consecutivas: mostra, em formato de planilha ou gráfico, a probabilidade de ocorrência de falhas durante dois, três, quatro, cinco e seis (ou mais) meses consecutivos.

6 - RESULTADOS

6.1 - Otimização da Geração de Energia

A seguir, temos os resultados da solução do problema de programação linear, visando a maximização da geração de energia pela UHE e obedecendo as restrições impostas pelas características físicas do local e pelos outros usos das águas do reservatório. Foram utilizados os dados de vazões médias mensais naturais fornecidas pelo ONS (anexo A). Os anos utilizados foram os de 1955, 1935 e 1983, um ano seco, um ano de vazões médias e um ano chuvoso, respectivamente.

A variação dos volumes armazenados no reservatório para o ano de 1955 foi a seguinte (figura 39):

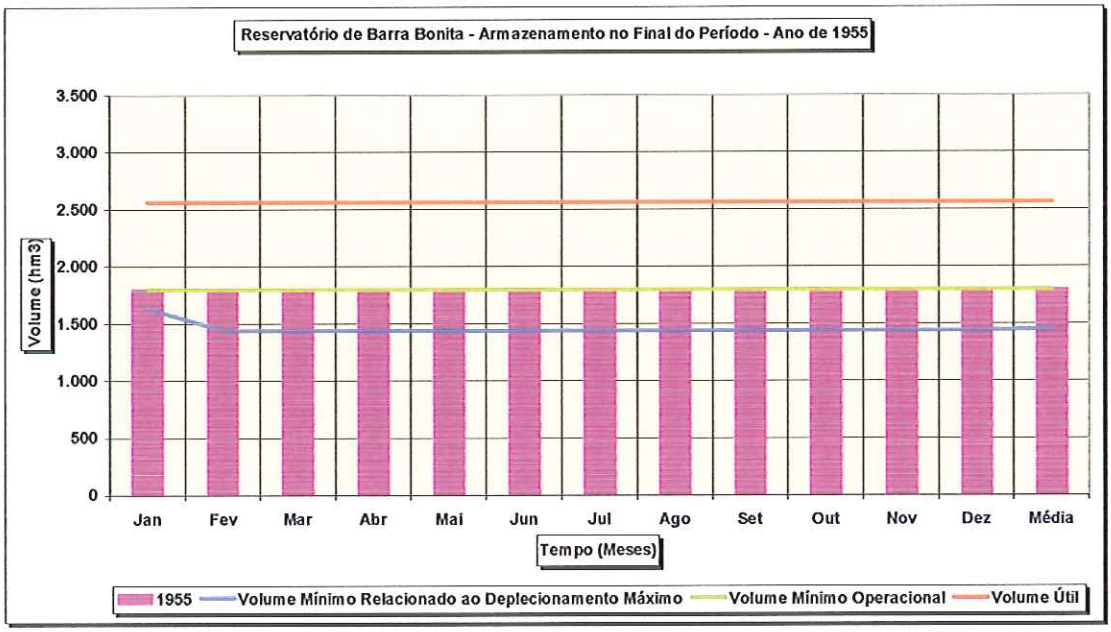


FIGURA 39 - Variação do armazenamento no reservatório no ano de 1955

Observa-se que, como se trata de um ano muito seco, os volumes se mantêm no limite mínimo em todo o período.

A variação dos volumes armazenados no reservatório para o ano de 1935 foi a seguinte (figura 40):

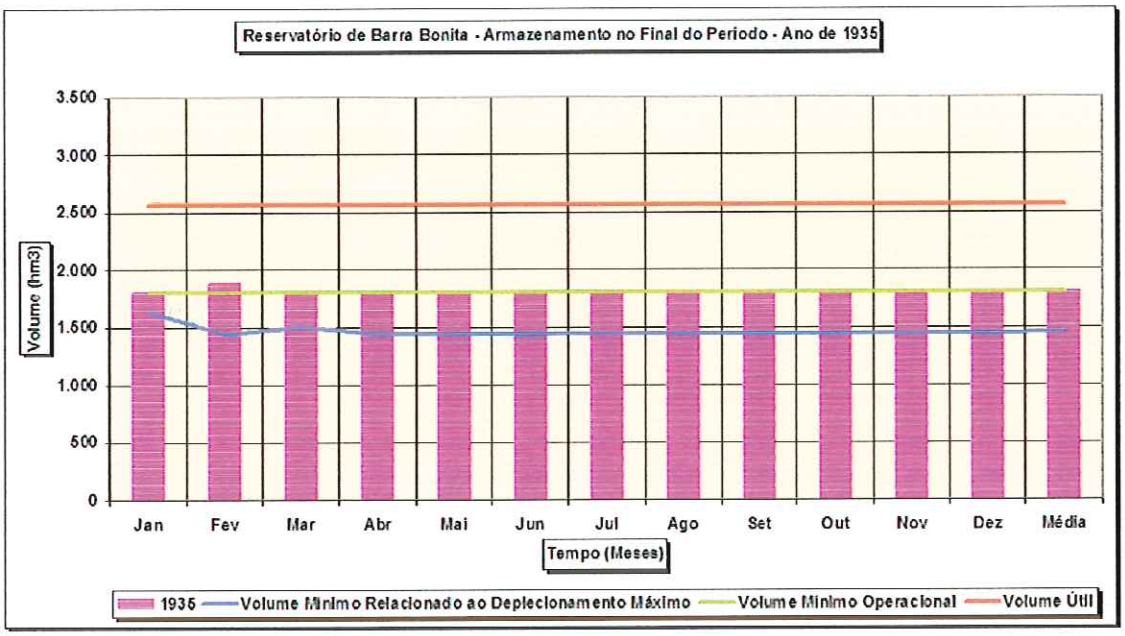


FIGURA 40 - Variação do armazenamento no reservatório no ano de 1935

Neste caso, os volumes também se mantêm no limite mínimo em praticamente todo o período. Isto se explica pelo fato de o modelo utilizar o máximo possível de água para a geração de energia.

A variação dos volumes armazenados no reservatório para o ano de 1983 foi a seguinte (figura 41):

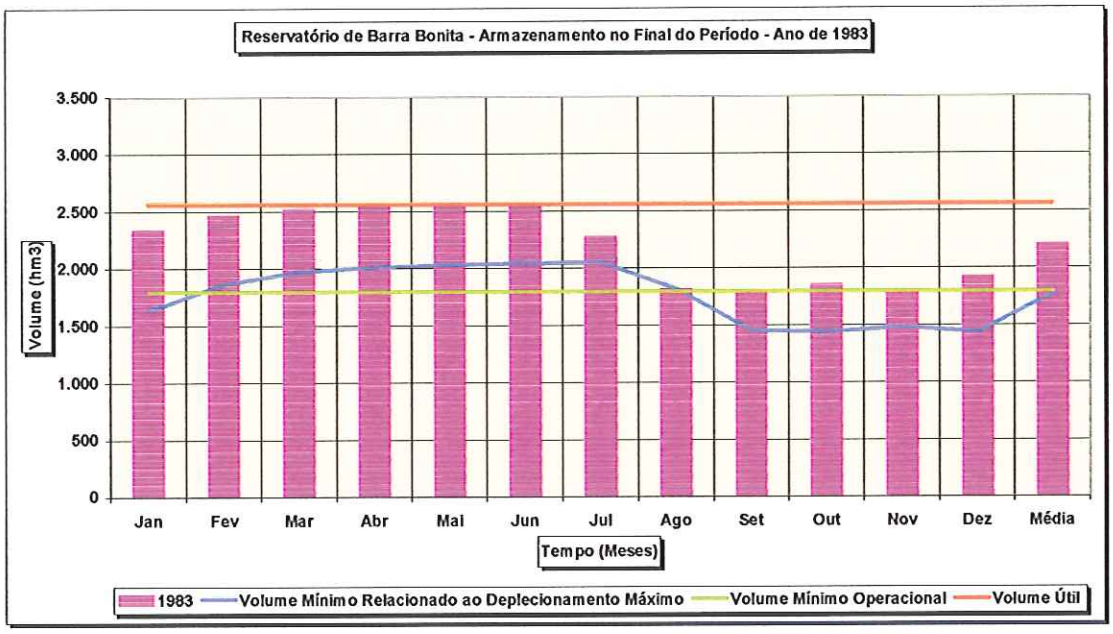


FIGURA 41 - Variação do armazenamento no reservatório no ano de 1983

Nesta situação, como se trata de um ano muito chuvoso, já houve uma maior alteração nos volumes armazenados, variando entre os limites máximos e mínimos.

A variação dos NAs nos 3 anos considerados foi a seguinte (figura 42):

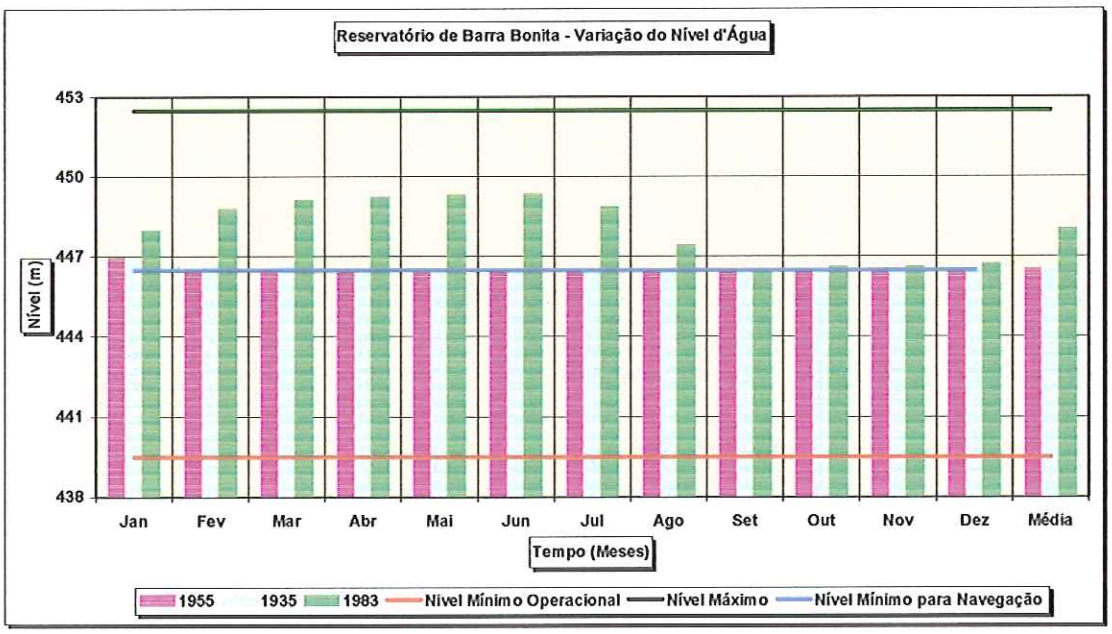


FIGURA 42 - Variação dos NAs

Observa-se que em todos os períodos, os valores de NA se mantiveram dentro dos limites, garantindo a possibilidade de navegação no reservatório.

A variação dos valores de vazões turbinadas nos 3 anos considerados foi a seguinte (figura 43):

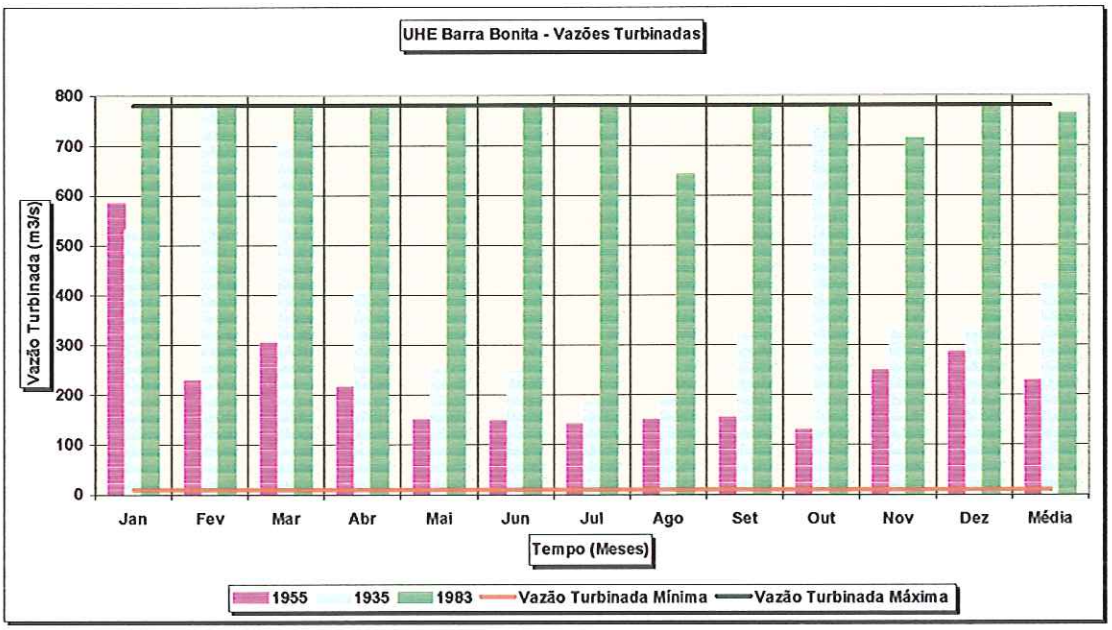


FIGURA 43 - Variação dos valores de vazões turbinadas

Obviamente, as vazões turbinadas no ano de 1955 apresentaram valores reduzidos. No ano de 1935, os valores variaram simultaneamente com a ocorrência de períodos chuvosos (Janeiro a Abril e Outubro a Dezembro), apresentando valores elevados, e períodos de estiagem (Maio a Setembro), apresentando valores mais baixos. No ano de 1983, os valores se mantiveram em praticamente todo o período próximos ao limite máximo.

A variação dos valores de vazões vertidas nos 3 anos considerados foi a seguinte (figura 44):

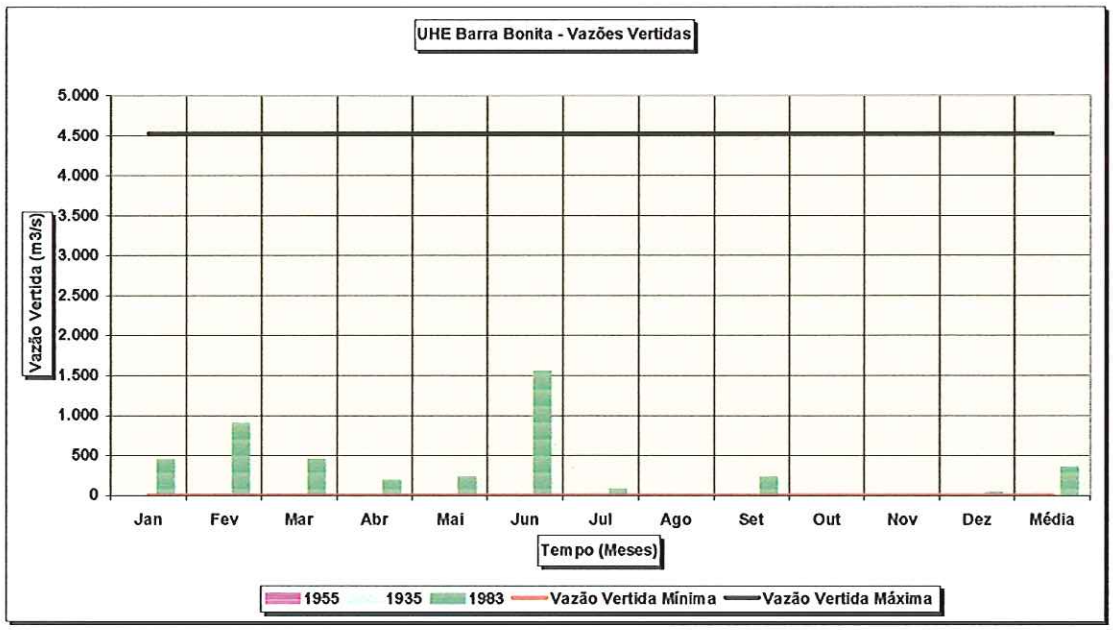


FIGURA 44 - Variação dos valores de vazões vertidas

Nos anos de 1955 e 1935, praticamente não houve ocorrência de vertimento de água do reservatório. Já as vazões médias mensais vertidas no ano de 1983 se mantiveram dentro dos limites, permanecendo longe do limite máximo dos vertedores.

A variação dos valores de vazões médias mensais liberadas pelo reservatório, considerando a soma das vazões turbinadas e vertidas nos 3 anos considerados, foi a seguinte (figura 45):

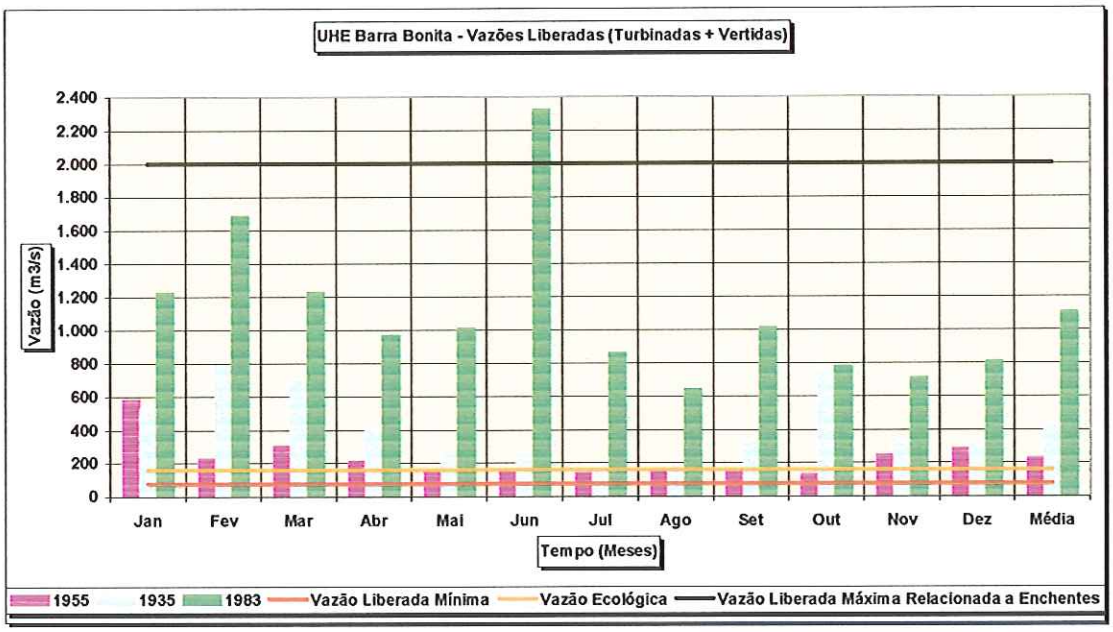


FIGURA 45 - Variação dos valores de vazões liberadas pelo reservatório

No ano de 1955, os valores de vazões médias mensais liberadas se mantiveram próximas ao limite recomendável mínimo, que é o da $Q_{7,10}$. Porém, pode se observar que não foi possível garantir a vazão ecológica no período de Maio a Junho deste ano. No ano de 1935, como no caso das vazões turbinadas, houve variação sazonal nos valores das vazões liberadas, apresentando valores elevados nos períodos chuvosos (Janeiro a Abril e Outubro a Dezembro), e valores mais baixos nos períodos de estiagem (Maio a Setembro). Os valores se mantiveram entre os limites máximo e mínimo. No ano de 1983, as vazões médias mensais liberadas se apresentam com valores mais elevados. Deve-se destacar o mês de Junho, onde devido à ocorrência de um elevado valor médio diário de vazão, atípico para o período, não foi possível obedecer a restrição de vazão máxima relacionada a enchentes.

Finalmente, seguem os valores obtidos de potência gerada (figura 46):

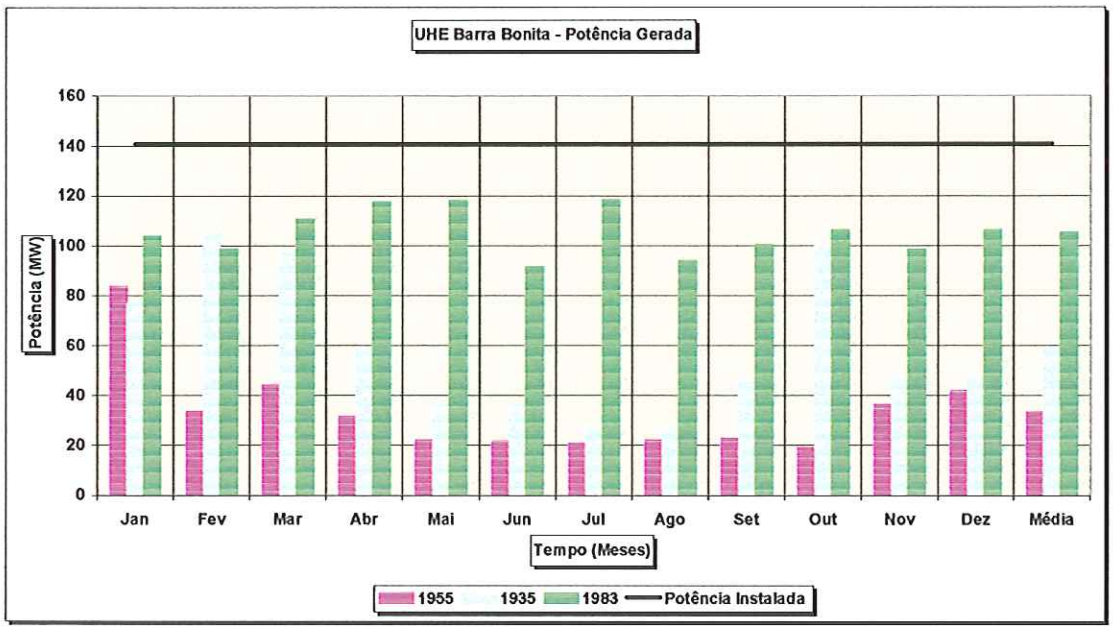


FIGURA 46 - Variação dos valores de potência gerada pela UHE

Em ambos os anos, os valores de potência gerada variam proporcionalmente aos valores de vazão turbinada, além de também apresentarem uma certa variação sazonal, entre períodos chuvosos e de estiagem. Também neste caso, deve se destacar o mês de Junho de 1983, onde houve um valor médio mensal de potência gerada fora da tendência do período. Todos os valores se mantiveram entre os limites mínimo e máximo.

6.1.1 - Cartas de Decisão para a UHE Barra Bonita

Para a utilização das cartas de decisão, o volume inicial poderá ser informado pelo controle operacional do reservatório. No caso da utilização da carta de decisão a nível mensal, as vazões afluentes poderão ser determinadas através de regionalização hidrológica, utilizando-se dados de previsão meteorológica da precipitação na bacia hidrográfica do reservatório. No caso da utilização da carta de decisão a nível diário, as vazões afluentes poderão ser determinadas através de qualquer modelo de previsão de vazões.

A seguir, encontram-se as cartas de decisão da UHE Barra Bonita a nível mensal (figura 47) e a nível diário (figura 48):

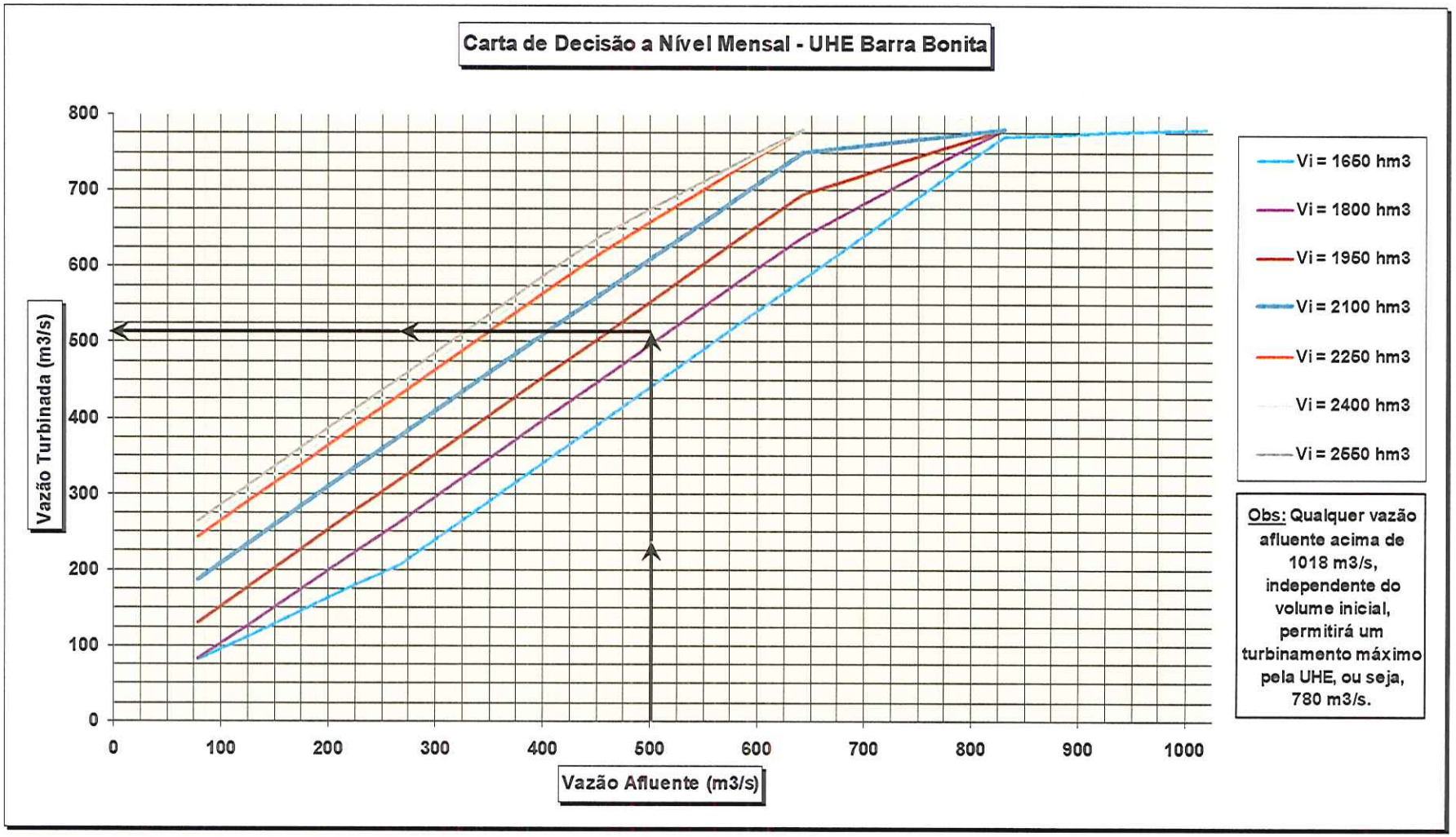


FIGURA 76 - Carta de Decisão a Nível Mensal da UHE Barra Bonita

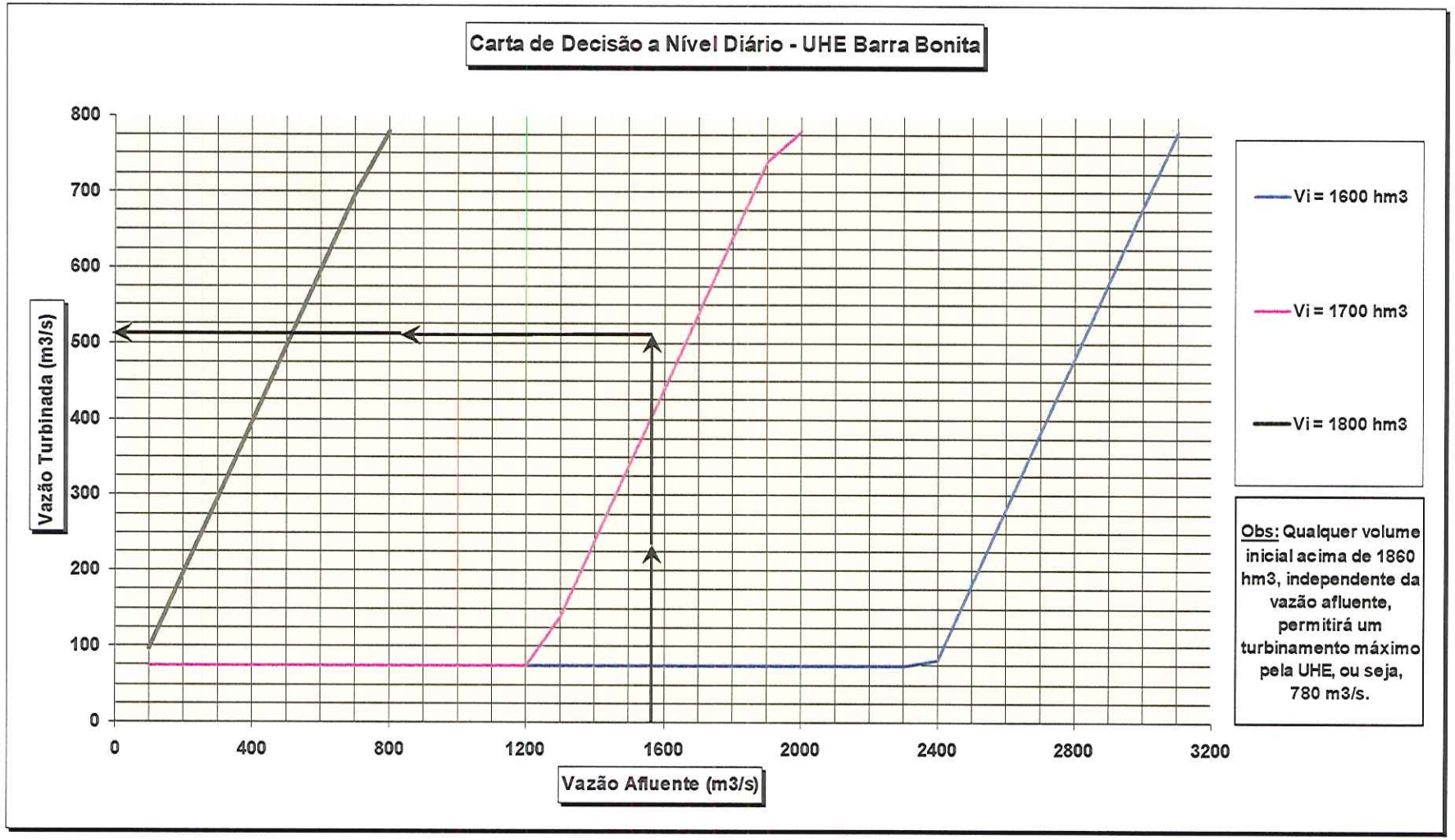


FIGURA 48 - Carta de Decisão a Nível Diário da UHE Barra Bonita

6.2 - Simulação Computacional dos Usos Múltiplos no Reservatório

6.2.1 - Simulação Contínua

Por razões de melhor visualização, os gráficos dos resultados da Simulação Contínua foram gerados através de planilhas eletrônicas do Excel.

Nas figuras 49, 50 e 51, encontra-se a variação dos volumes armazenados no reservatório, para cada um dos cenários simulados:

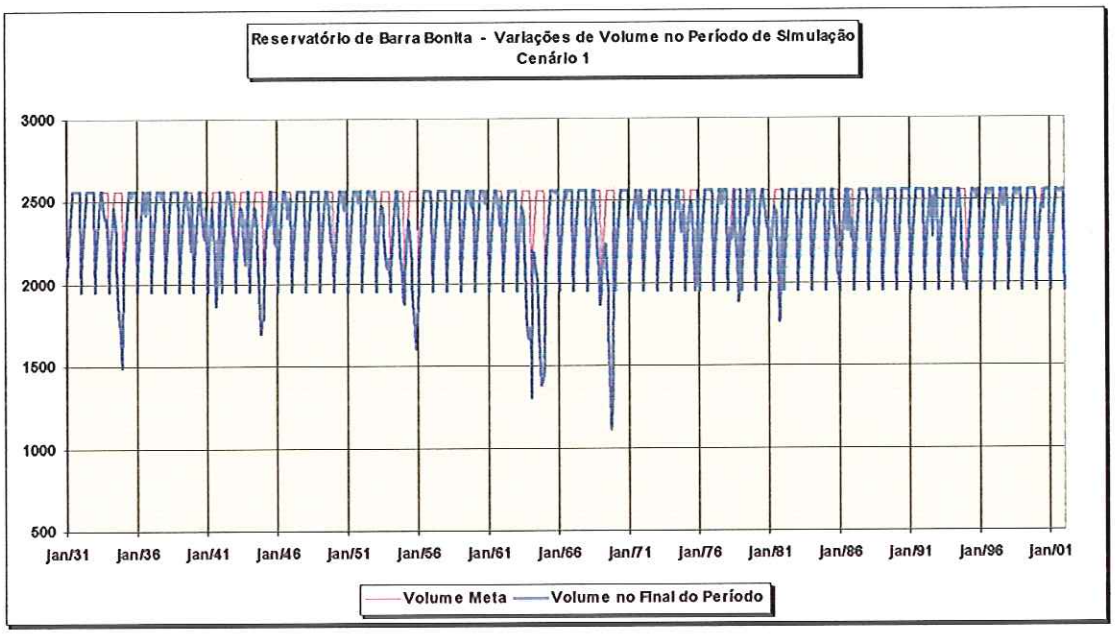


FIGURA 49 - Variação dos volumes no reservatório no cenário 1

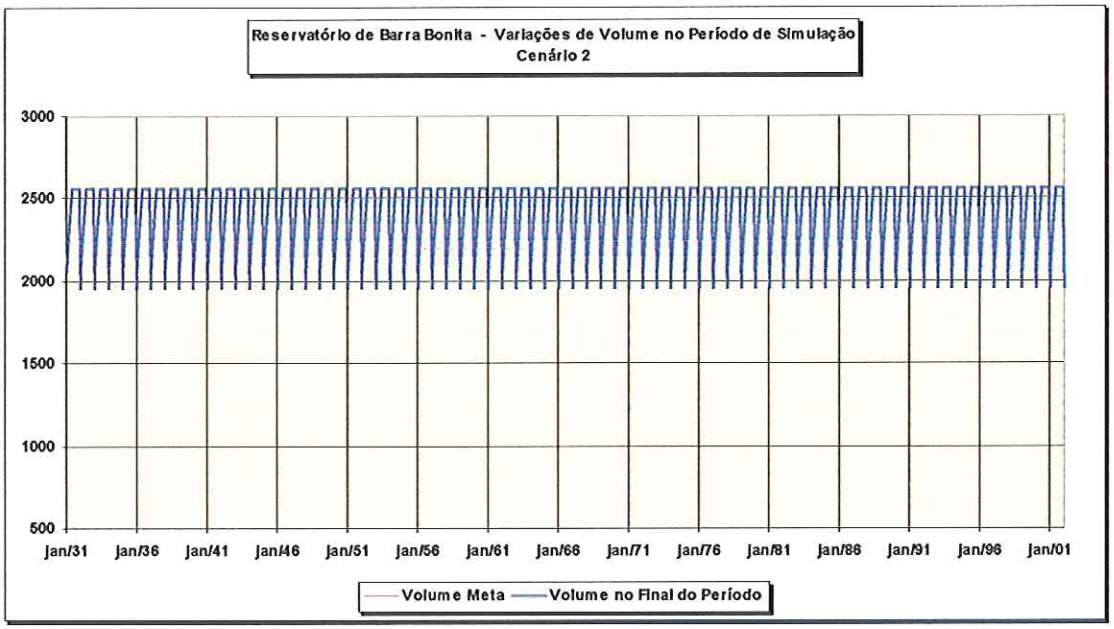


FIGURA 50 - Variação dos volumes no reservatório no cenário 2

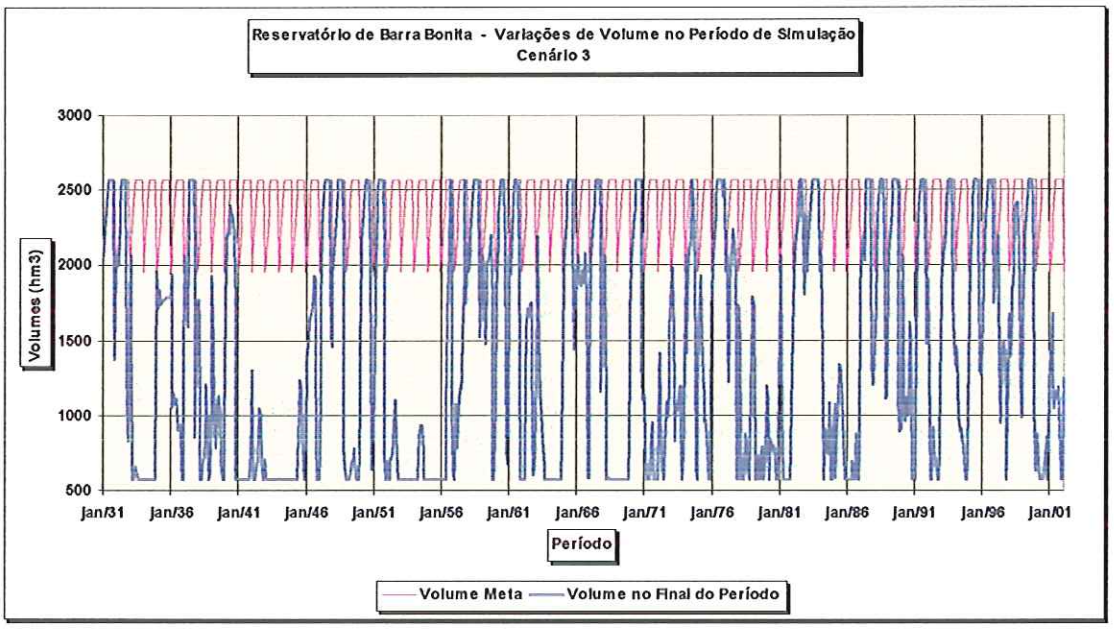


FIGURA 51 - Variação dos volumes no reservatório no cenário 3

Percebe-se que os valores dos volumes no cenário 1 se mantiveram na maior parte do tempo próximos à meta de armazenamento, apesar da ocorrência de algumas falhas. No cenário 2, estes se mantiveram na totalidade do tempo equivalentes ao volume meta. Já no cenário 3, os volumes se mantiveram bem abaixo do volume meta em grande parte do tempo.

Nas figuras 52, 53 e 54, encontra-se a variação das vazões fornecidas para a geração de energia pela UHE, para cada um dos cenários simulados:

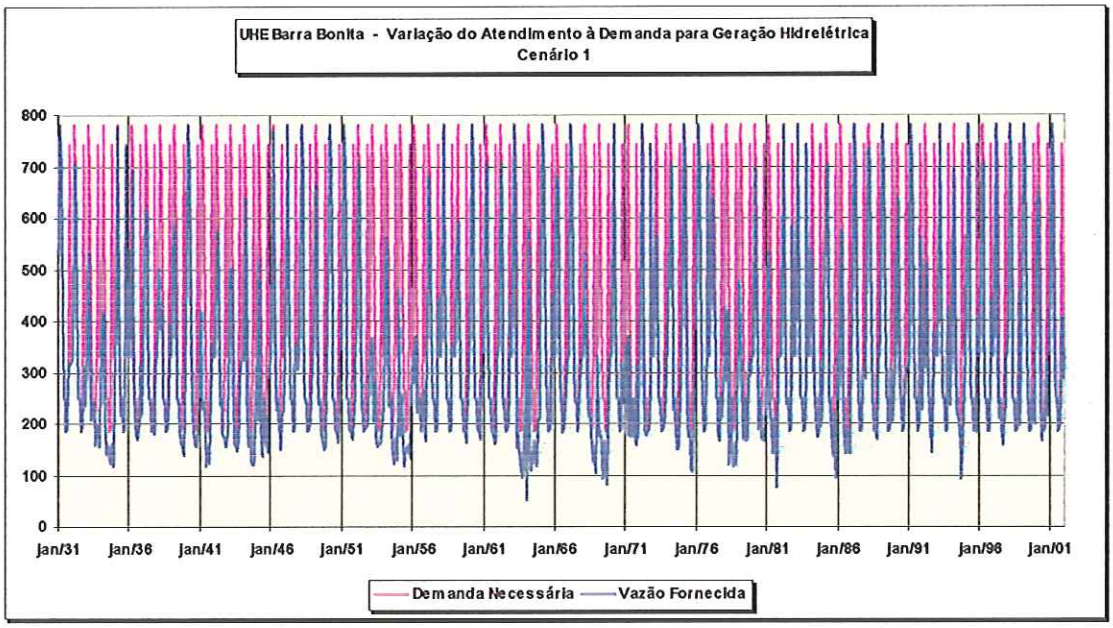


FIGURA 52 - Variação das vazões fornecidas para a UHE no cenário 1

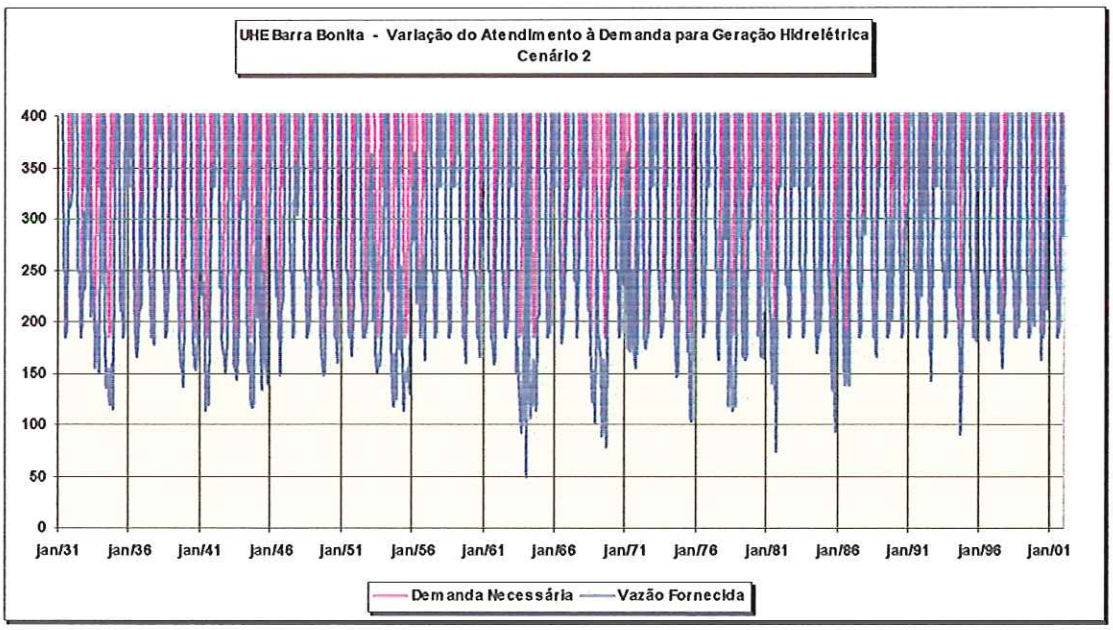


FIGURA 53 - Variação das vazões fornecidas para a UHE no cenário 2

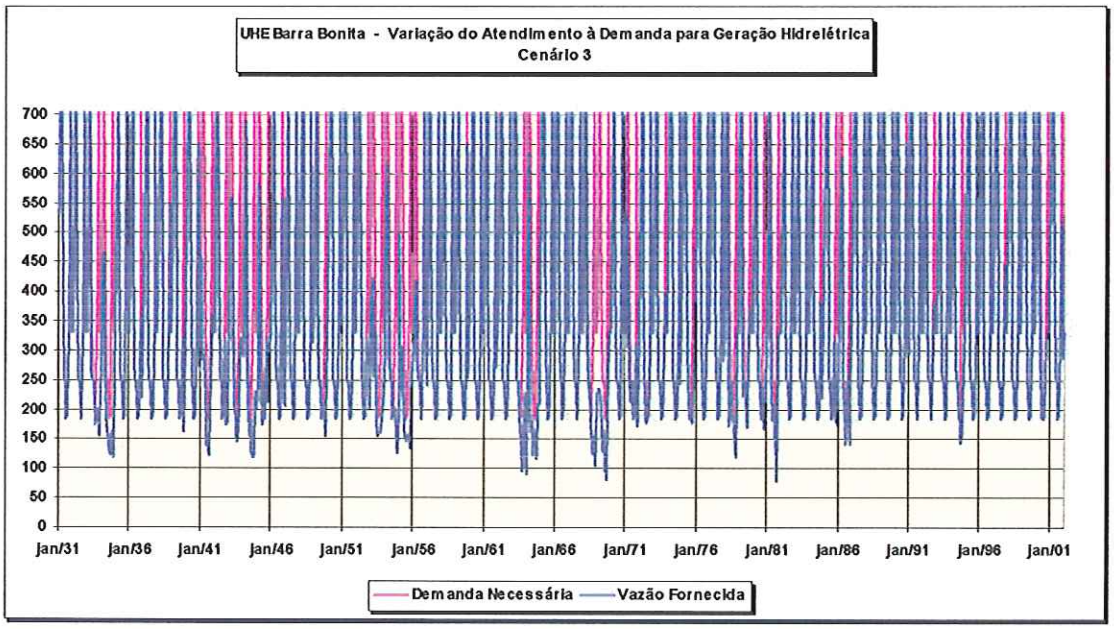


FIGURA 54 - Variação das vazões fornecidas para a UHE no cenário 3

Percebe-se que, no cenário 2, onde a navegação tem prioridade sobre a geração de energia, ocorreu um número bem maior de falhas se comparado aos cenários 1 e 3, onde a geração de energia tem prioridade igual e maior, respectivamente.

Nas figuras 55, 56 e 57, encontra-se a variação das vazões liberadas, ou seja, as soma das vazões turbinadas e vertidas, para cada um dos cenários simulados:

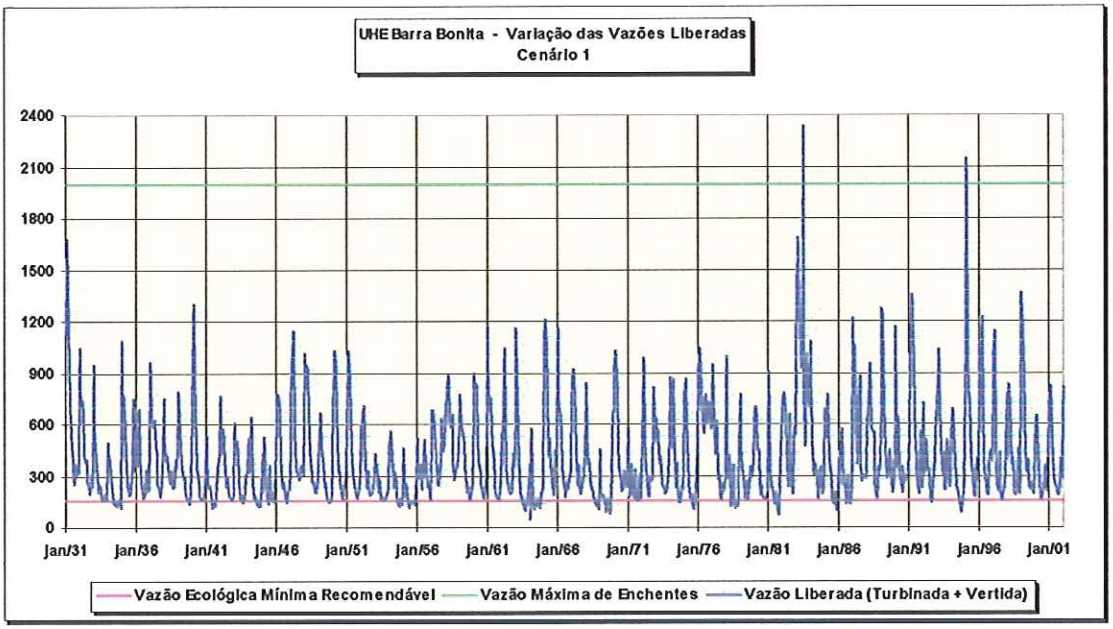


FIGURA 55 - Variação das vazões liberadas no cenário 1

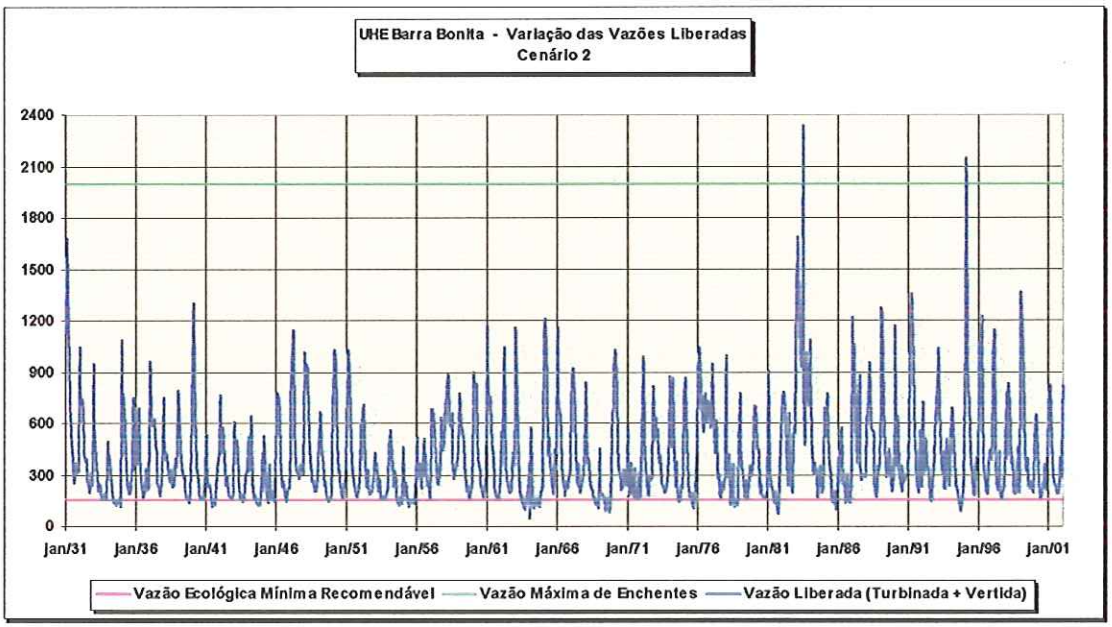


FIGURA 56 - Variação das vazões liberadas no cenário 2

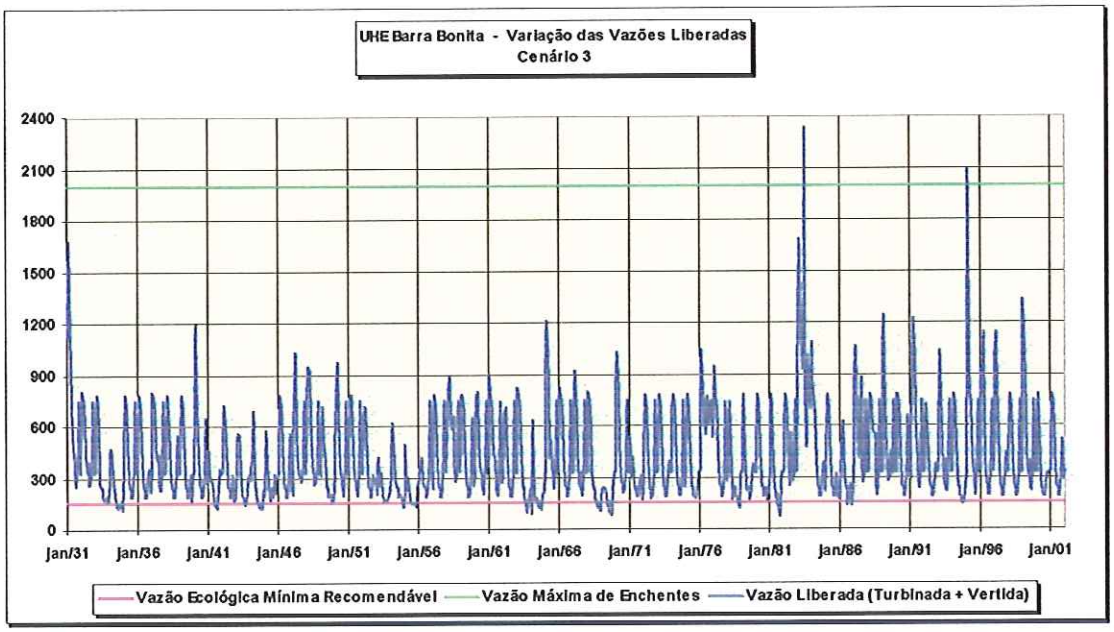


FIGURA 57 - Variação das vazões liberadas no cenário 3

Observa-se que, apesar dos valores de vazões liberadas se manterem na maior parte do tempo entre os limites mínimo e máximo, em todos os cenários ocorreram alguns valores de vazões abaixo da vazão ecológica. Houve também 2 ocorrências de valores de vazões acima da máxima relacionada a enchentes.

Nas figuras 58, 59 e 60, encontra-se a variação das vazões fornecidas para as eclusagens, para cada um dos cenários simulados:

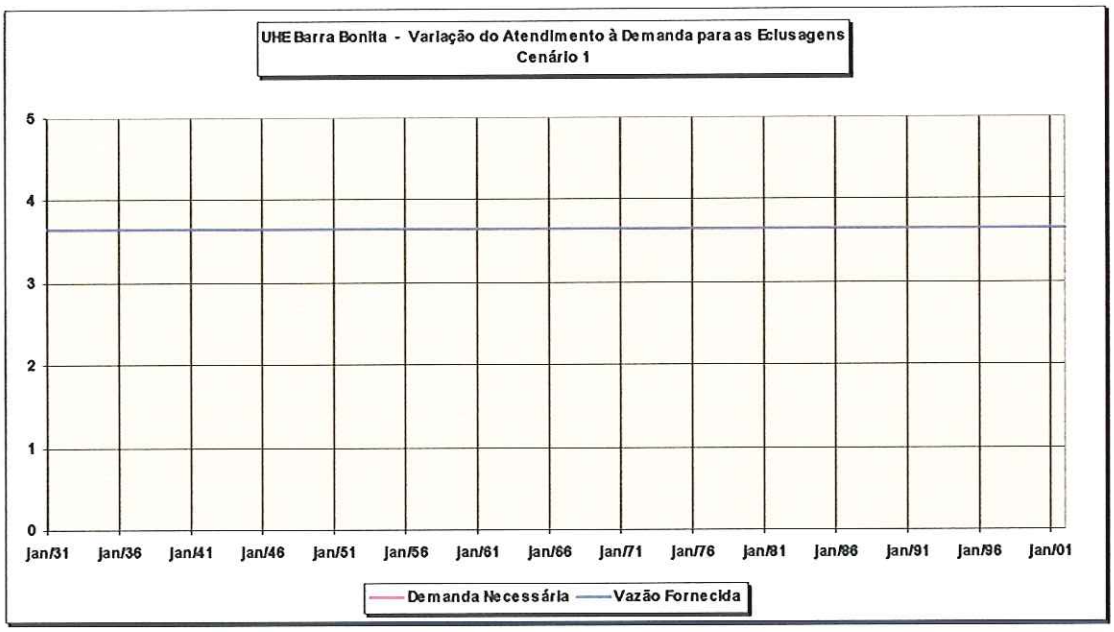


FIGURA 58 - Variação das vazões fornecidas para a eclusa no cenário 1

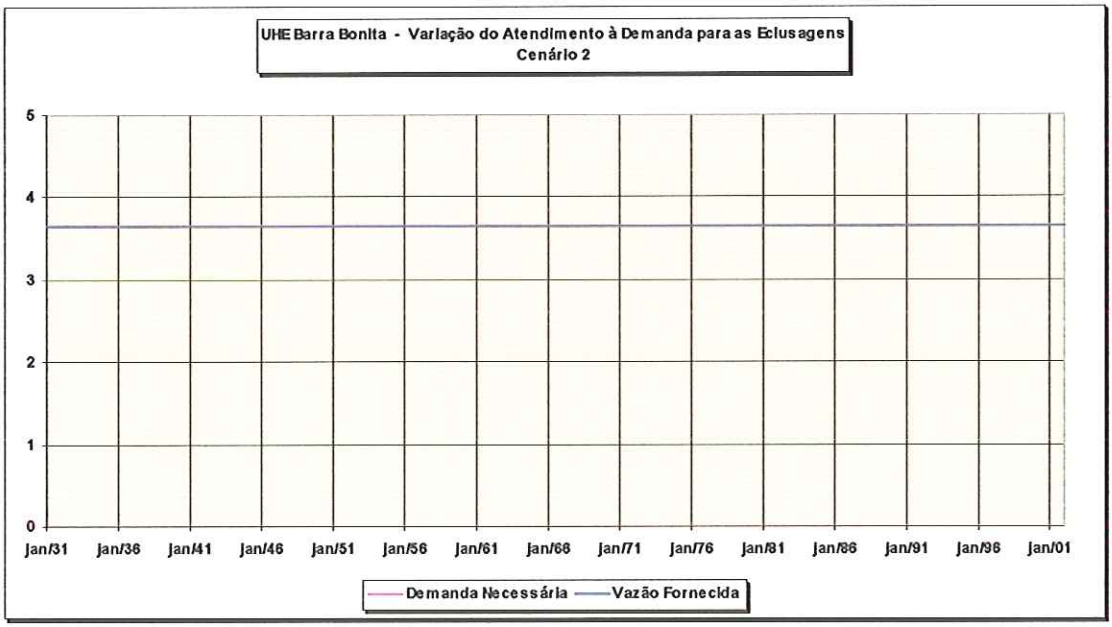


FIGURA 59 - Variação das vazões fornecidas para a eclusa no cenário 2

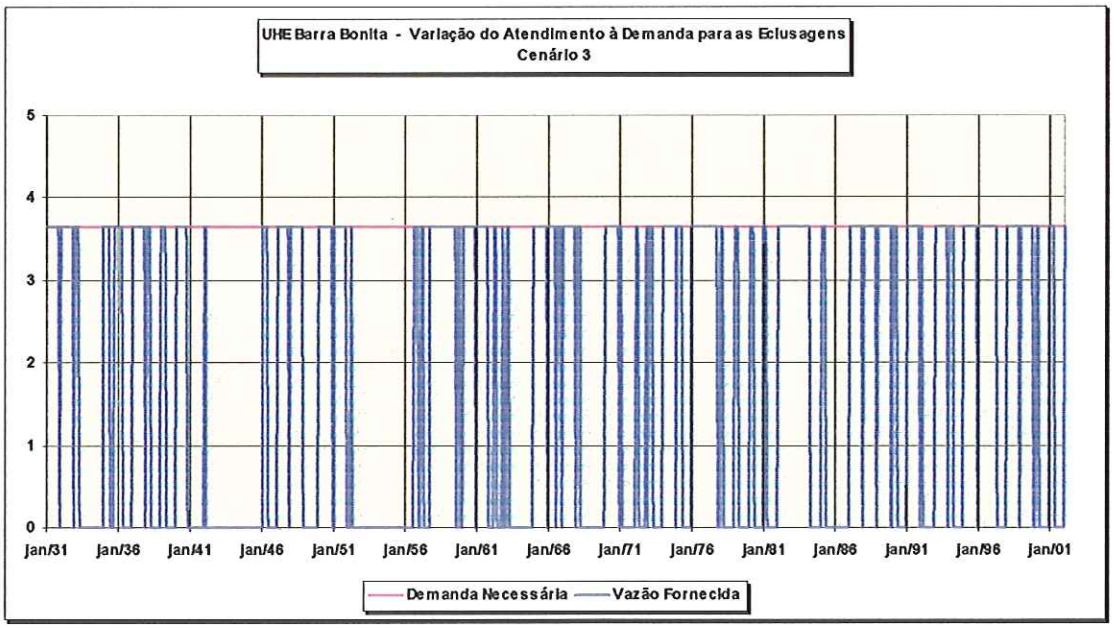


FIGURA 60 - Variação das vazões fornecidas para a eclusa no cenário 3

Nos cenários 1 e 2, a demanda de vazões para a eclusa pôde ser atendida na totalidade do tempo. Já no cenário 3, ocorreram diversas falhas no atendimento.

Para uma melhor compreensão destes resultados, será feita uma avaliação dos mesmos através de índices de desempenho, conhecidos como confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, os quais foram gerados para cada um dos cenários de simulação, conforme figuras 61, 62 e 63:

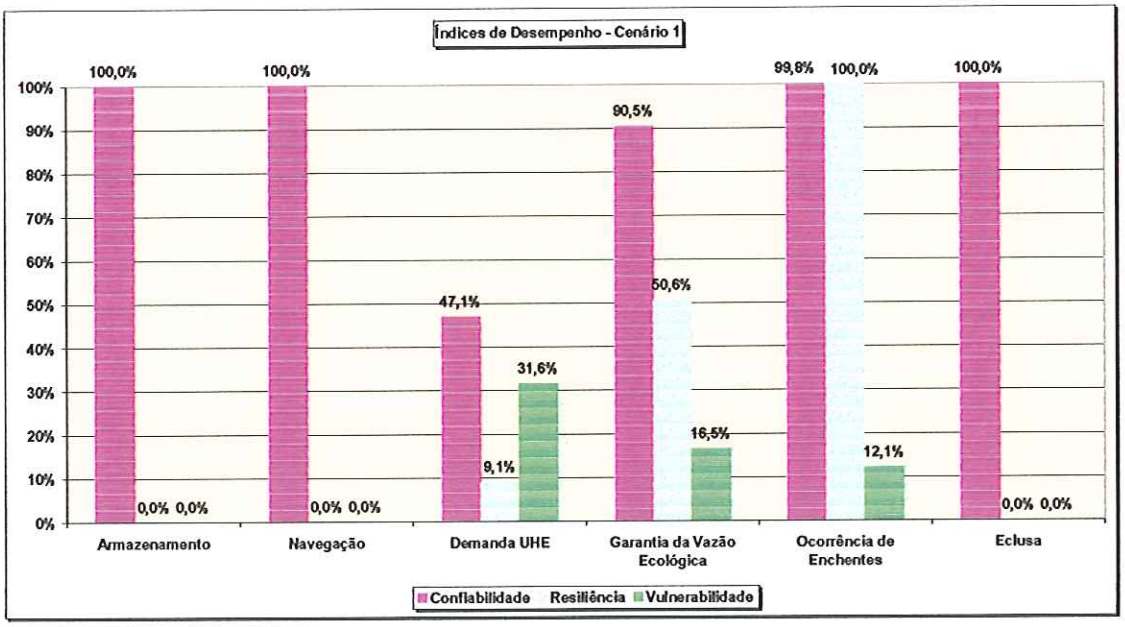


FIGURA 61 - Índices de desempenho para o cenário 1

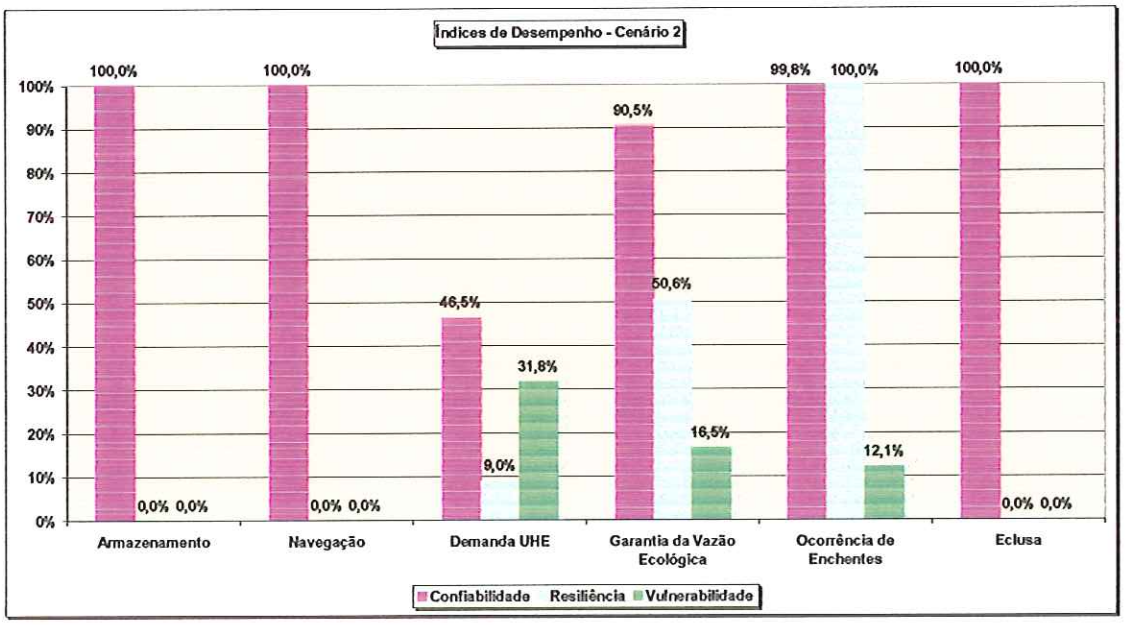


FIGURA 62 - Índices de desempenho para o cenário 2

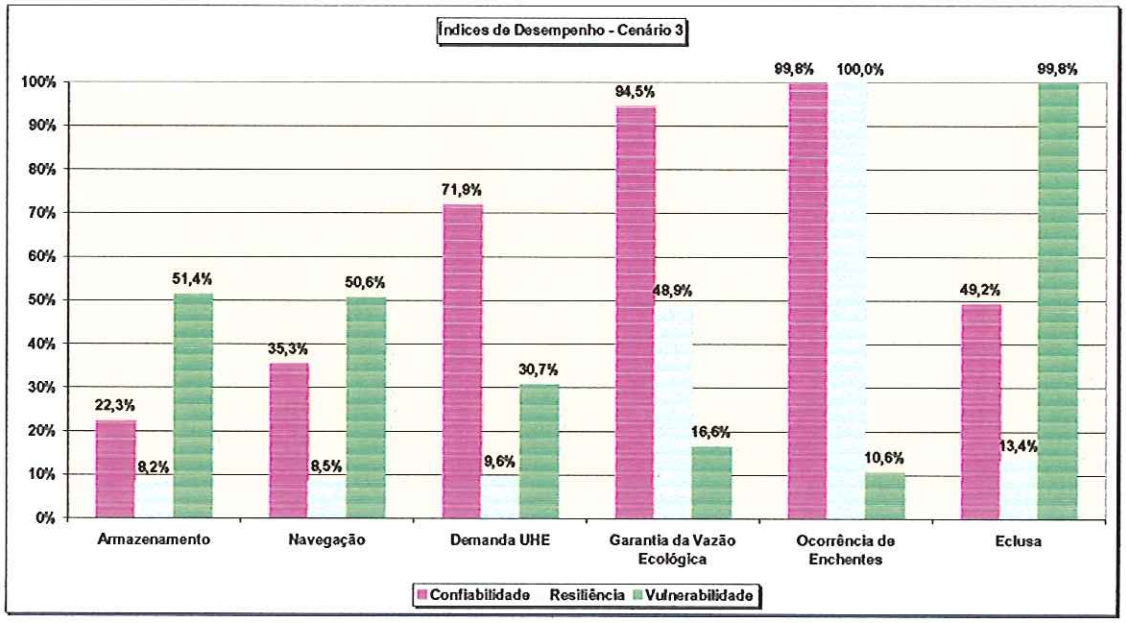


FIGURA 63 - Índices de desempenho para o cenário 3

A próxima etapa é fazer a comparação entre estes 3 cenários e definir qual deles é o melhor.

De imediato, observa-se que o cenário 3 é o pior deles, pois apresenta um valor extremamente baixo de confiabilidade para o armazenamento no reservatório e para a navegação. Além disso, o atendimento da demanda das eclusagens possui confiabilidade muito baixa e praticamente 100% de vulnerabilidade. Obviamente, a confiabilidade do atendimento das demandas da UHE é maior do que nos ouros 3 cenários, devido ao fato desta ter prioridade em cima dos outros usos neste cenário.

No entanto, deve-se buscar o equilíbrio no atendimento de todas as demandas, fato que pode ser observado nos resultados dos cenários 1 e 2. Percebe-se que os índices de desempenho para os 2 cenários são praticamente iguais. A confiabilidade e a vulnerabilidade no atendimento da demanda da UHE no cenário 2, as quais apresentaram valores de 46,5% e 31,8%, são praticamente iguais àquelas do cenário 1, com valores de 47,1% e 31,6%, respectivamente.

Portanto, o cenário 1 foi definido como o melhor dentre os 3 cenários analisados, pelo fato de dar igual prioridade aos 2 usos principais das águas do reservatório. Parte-se agora para a realização do Planejamento Tático para este cenário.

6.2.2 - Planejamento Tático

Na figura 64, encontra-se a variação, ao longo do horizonte de planejamento, da probabilidade do reservatório atingir no fim de cada mês a percentagem referente a seu volume útil, ou seja, 75,6% do volume total:

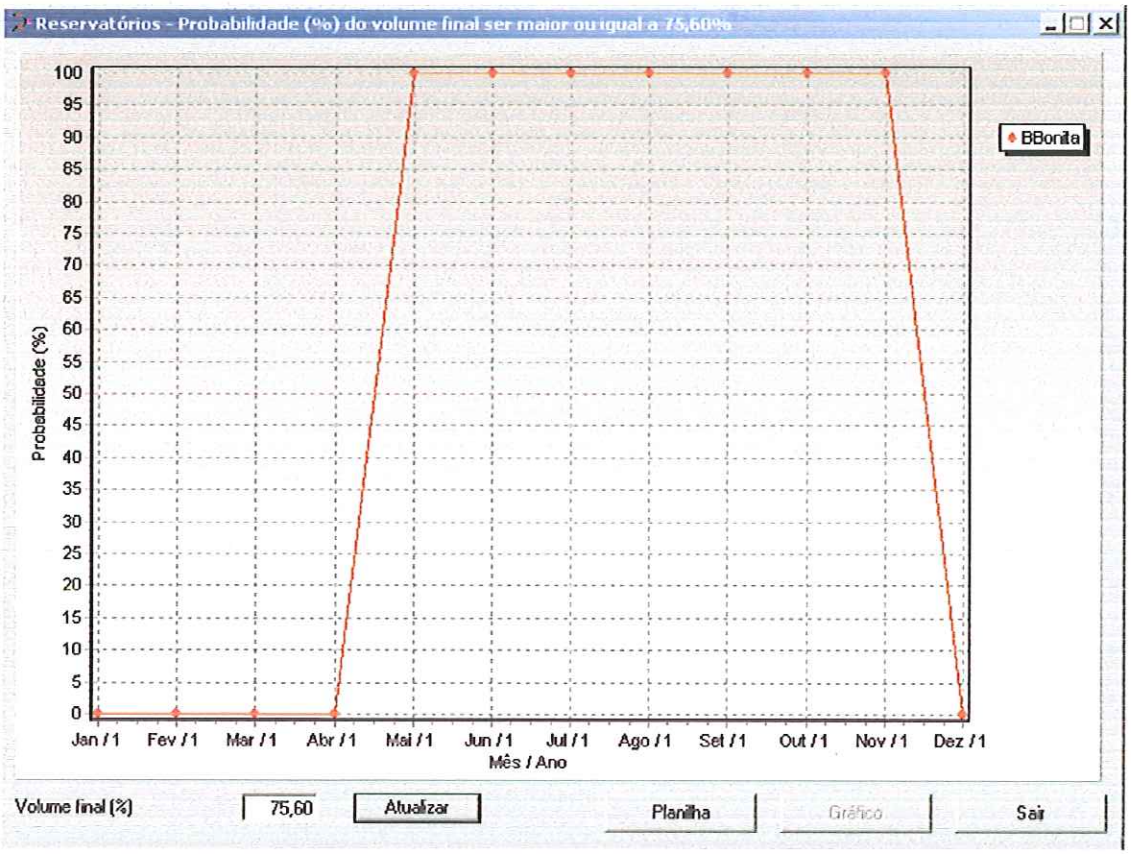


FIGURA 64 - Probabilidades de o reservatório atingir o volume útil no fim de cada mês

Observa-se que nos meses de Janeiro a Abril e de Dezembro, onde há uma combinação entre demandas da UHE elevadas e menores metas de armazenamento, a probabilidade de o reservatório estar cheio no fim do mês é nula. Já nos outros meses, onde as demandas são menores e as metas de armazenamento maiores, esta probabilidade é de 100%.

Na figura 65, encontra-se a variação, ao longo do horizonte de planejamento, da probabilidade de ocorrência de falhas no mês:

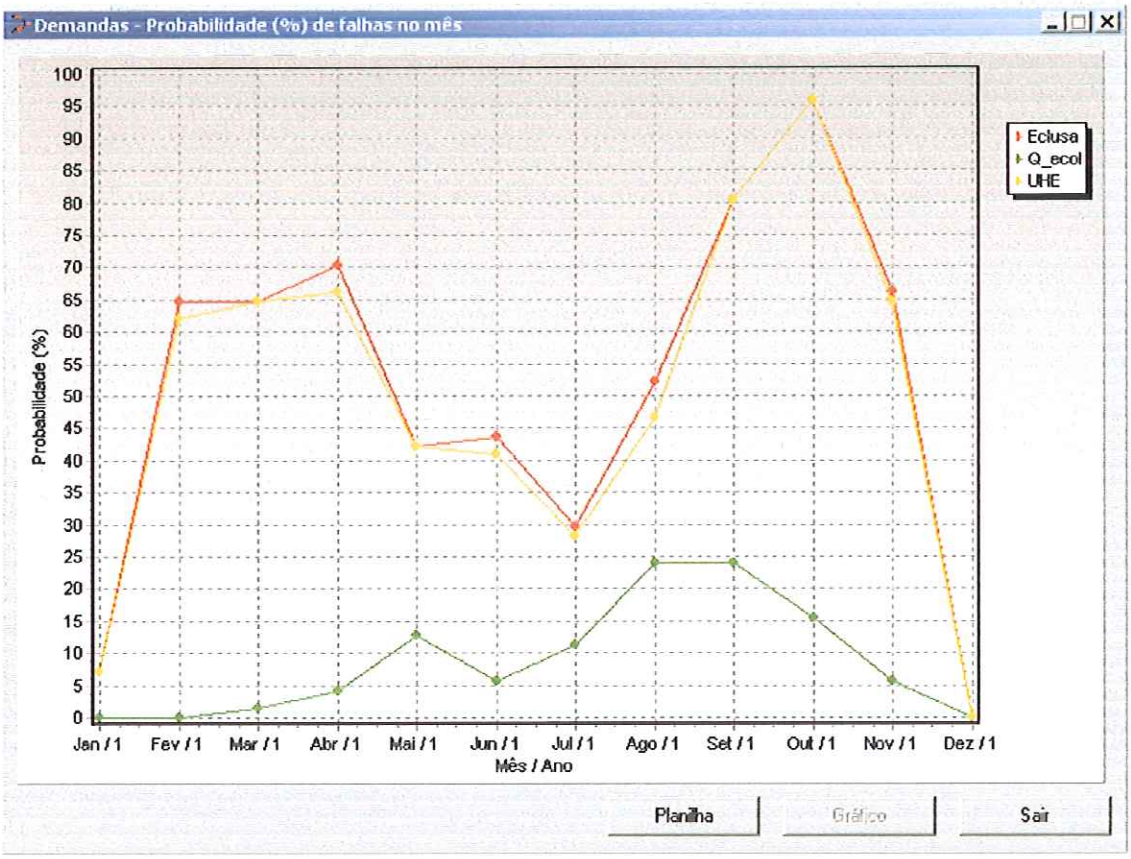


FIGURA 65 - Probabilidades de ocorrência de falhas em cada mês

Já a figura 66 mostra a variação, ao longo do horizonte de planejamento, da probabilidade de ocorrência de falhas durante dois ou mais meses consecutivos:

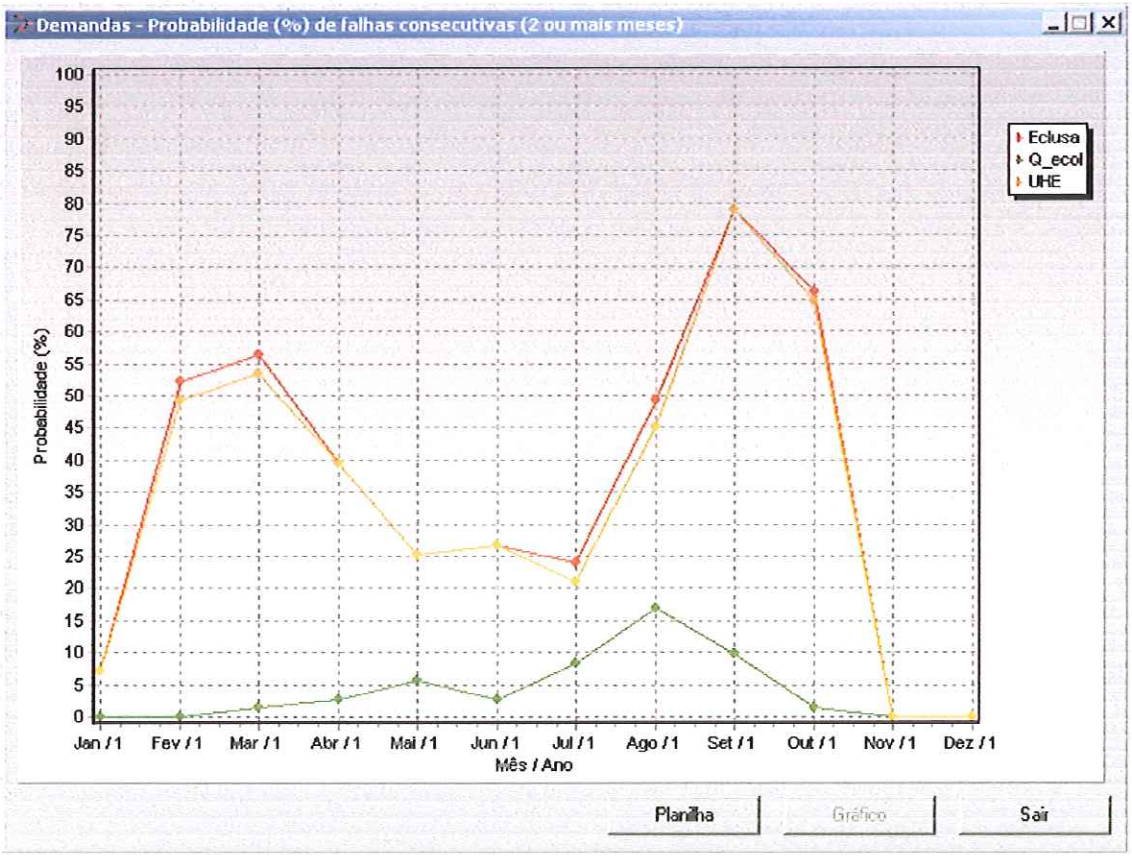


FIGURA 66 - Probabilidades de ocorrência de falhas em 2 ou mais meses

Em ambos os casos, as probabilidades de ocorrerem falhas no atendimento da demanda de vazão ecológica são menores. Nos meses de Janeiro a Março e de Setembro a Outubro, como as demandas da UHE são maiores, as probabilidades de ocorrerem falhas são maiores.

7 - CONCLUSÕES

Através da descrição do local de estudo, pode-se perceber que se trata de um sistema complexo de recursos hídricos e é importante uma análise da disponibilidade hídrica no reservatório. O número de estudos existentes dos aspectos quantitativos do reservatório, se comparado ao número de estudos dos aspectos qualitativos, é extremamente baixo, frente a importância estratégica do reservatório, que é utilizado para navegação e geração de energia.

Não existem informações sobre as condições do assoreamento no reservatório. No entanto, sabe-se que o processo ocorre, pois este se encontra em uma região propícia ao processo, além de ser um reservatório antigo do estado. Desta forma, será objeto de pesquisa futura a execução de levantamento batimétrico no reservatório, seguido de estudos de previsão de sua vida útil.

Foi realizada a otimização da geração de energia pela UHE, considerando 3 condições hidrológicas para a realização da otimização: um ano muito seco (1955), um ano de vazões médias (1935) e um ano muito chuvoso (1983). Pôde-se observar que nas 3 condições, foi possível manter os volumes e os níveis no 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 capacidade dos vertedores, respectivamente. No caso das vazões liberadas, em alguns casos não foi possível atingir o valor mínimo da vazão ecológica. Além disso, no mês de Junho do ano de 1983, não foi possível manter obedecer ao limite de vazão máxima relacionada a enchentes, pois se tratou de um evento atípico para o período. Os valores de potência instalada

também se mantiveram dentro dos limites físicos impostos pela potência instalada da UHE.

Em seguida, foi realizada simulação computacional dos usos múltiplos no reservatório, considerando 3 cenários distintos. Observou-se que no cenário 3, os outros usos das águas, que não a geração de energia, possuem índices de desempenho muito baixos, tendo sido descartado este cenário. Os cenários 1 e 2 apresentaram valores de índices de desempenho bem parecidos. Entretanto, o cenário 1 foi escolhido como o melhor entre os 3, pois dá igual prioridade aos principais usos das águas do reservatório.

Na segunda etapa, partiu-se para a realização do Planejamento Tático para este cenário. Observou-se que a probabilidade do reservatório estar com seu volume útil no fim do mês era nula nos meses onde há uma combinação de demandas elevadas da UHE e valores menores das metas de armazenamento, ou seja, de Janeiro a Abril e em Dezembro. Já nos outros meses, essa probabilidade foi de 100%.

Em ambas as hipóteses de possibilidade de ocorrência de falhas, considerando ao menos uma falha no mês e falhas em 2 ou mais meses consecutivos, as probabilidades eram maiores nos meses de Janeiro a Março e de Setembro a Outubro, onde as demandas da UHE são maiores.

A partir de todos esses resultados, pode-se concluir que a metodologia utilizada se apresentou adequada para este tipo de análise, pois forneceu resultados concisos e realistas. Foi possível considerar com um bom grau de fidelidade as restrições físicas do modelo, garantido a possibilidade de consideração destes resultados no planejamento da operação do reservatório e da UHE.

Apesar de as técnicas de simulação levarem vantagem em relação àquelas de otimização, pelo fato de melhor representarem fisicamente o sistema, estas não devem ser consideradas técnicas que competem entre si, mas sim cooperantes entre si, no sentido de possibilitarem análises mais detalhadas, geralmente em termos probabilísticos. Esta é a razão de ter sido usada uma associação entre estas 2 técnicas neste trabalho.

Sugere-se como tema de pesquisa futura, a aplicação destes estudos a outros reservatórios localizados no Rio Tietê (Bariri, Ibitinga, Promissão e Nova

Avanhandava), sendo que, nesta próxima avaliação, deve-se considerar um sistema em cascata.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-TALEB, M. F.; MARESCHAL, B. (1995). *Water Resources Planning in the Middle West: Application of the Promethee V Multicriteria Method*, European Journal of Operational Research, Vol. 81, pp. 500-511.

ANDRADE, P. R. G. S. et al. (2001). *Otimização da Operação do Sistema Hídrico Jucazinho-Carpina, para Múltiplos Usos, Via Modelo de Programação Não-Linear.* In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Aracaju - SE, Novembro.

ANDREU, J. et al. (1996). *AQUATOOL: A Generalized Decision-Suport System for Water Resources Planning and Operational Management.* Journal of Hidrology, Vol. 177, pp. 269-291.

ARCHIBALD, T. W. et al. (2001). *Controlling Multi-Reservoir Systems.* European Journal of Operational Research, Vol. 129, pp. 619-626.

AZAMBUJA, C. (2000). *Disponibilidade Hídrica na Bacia do Rio Piracicaba.* Dissertação de Mestrado, 200p. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.

AZEVEDO, L. G. T. et al. (1998). *Sistema de Apoio à Decisão para o Gerenciamento Integrado de Quantidade e Qualidade da água: Metodologia e Estudo de Caso.* Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 3, n. 1, pp. 21-51. Janeiro / Março.

_____. (2000). *Integration of Water Quantity and Quality in Strategic River Basin Planning*. Journal of Water Resources Planning and Management. Reston, Va., v.126, n.2, pp. 85 - 97.

BARBOSA, D. L. et al. (2001). *Um Estudo de Caso da Operação Integrada Ótima de Três Reservatórios em Paralelo com Usos Múltiplos*. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Aracaju - SE, Novembro.

BARTH, F. T. et al. (1987). *Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Editora Nobel, ABRH, São Paulo.

BELLA, A., DUCKSTEIN, L.; SZIDAROVSZKT, F. (1996). *A Multicriterion Analysis oh the Water Allocation Conflict in the Upper Rio Grande Basin*. Applied Mathematics and Computation, Vol. 77, pp. 245-265.

BRAGA, B. P. F. et al. (1983). *Curso de Engenharia Hidrológica, Vol. 2*. EPUSP - DAEE - ABRH. São Paulo.

BRANCO, S. M; ROCHA, A. A. (1977). *Poluição, Proteção e Usos Múltiplos de Represas*. Edgard Blucher, CETESB, São Paulo.

BRANDÃO, C.; RODRIGUES, R. (2000). *Hydrological Simulation of the International Catchment of Guadiana River*. Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 25, n.3, pp, 329-339.

CALIJURI, M. C.; TUNDISI, J. G. (1990). *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, Vol. 50, n.4, pp. 893-913.

CALIJURI, M. C. (1999). *A Comunidade Fitoplanctônica em um Reservatório Tropical (Barra Bonita, SP)*. Tese de Livre Docência, 211p., Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.

CALIJURI, M. C. et al. (2002). *Temporal Changes in the Phytoplankton Community Structure in a Tropical and Eutrophic Reservoir (Barra Bonita, SP - Brazil).* Journal of Plankton Research, Vol. 24, n.7, pp. 617-634.

CARVALHO, N. O. (1994). *Hidrossedimentologia Prática.* CPRM. Rio de Janeiro, 372p.

COMITÊ COORDENADOR DO PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (1999). *Plano Estadual de Recursos Hídricos 2000 - 2003.* Disponível em <http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/basecon/perh2000/sintese/sumario.htm>.

COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO SOROCABA-MÉDIO TIETÊ (199?). *Relatório Zero: Relatório da Situação Atual dos Recursos Hídricos na Bacia hidrográfica.* Disponível em <http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/ftp/relatorios/CRH/CBH-SMT/relsmtseg.pdf>. Acesso em 26 Jan. 2003.

COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ (1999). *Plano de Bacia Hidrográfica 2000-2003.* FEHIDRO, COPLAENGE Projetos de Engenharia. 1 CD-ROM.

COOMES, R.T. (1979). *Regulation of Arkansas Basin Reservoir*, The National Workshop on Reservoirs Systems Operations, pp 254-265, University Of Colorado, Boulder, Colorado, pp 13-17, August.

DROUIN, N. et al. (1996). *Piecewise Affine Approximations for the Control of a One-Reservoir Hydroelectric System.* European Journal of Operational Research, Vol. 89, pp. 53-69.

EMMERICH, W.; MARCONDES, M. A. P. (1975). *Algumas Características do Manejo de Bacias Hidrográficas.* São Paulo. (Boletim técnico IF).

EVANSON, D. E.; MOSELEY, J. C. (1970). *Simulation/Optimization Techniques for Multi-Basin Water Resource Planning*. Water Resource Bulletin, Vol. 6, n.5, pp. 725-736.

FEIRING, B. R. et al. (1998). .*A Sthocastic Programming Model for Water Resource Planning*. Mathematical and Computer Modelling, Vol 27, pp. 1-7.

FERREIRA, A. N. (2000). *Estudo do Efeito de Acidentes na Hidrovia Tietê-Paraná: Aspectos Preventivos*. Dissertação de Mestrado, 168 p., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP.

FIDALGO, J. (2002). *Barra Bonita*. Folha de São Paulo, São Paulo. Disponível em <http://www1.folha.uol.com.br/folha/turismo/americadosul/brasil-barra_bonita.shtml>.

FONSECA, C. P. (1990). *Estudo de Flutuações de Curta Duração na Comunidade Zooplanctônica, Barra Bonita, Médio Tietê, SP*. Dissertação de Mestrado, 175 p., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.

FRANCATO, A. L.; BARBOSA, P. S. F. (1996). *Programação Ótima da Operação Energética de Sistemas Hidroelétricos*. In: XVII Congresso Latino-Americano de Hidráulica, Guayaquil, Equador.

_____. (1997). *Fatores Determinantes das Propriedades Operativas Ótimas de um Sistema Hidroelétrico*. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Vitória - ES, Novembro.

FRANCATO, A. L. et al. (2000). *Um Modelo de Programação Não-Linear para a Otimização da Operação de Sistemas Hidrelétricos*. In: XIX Congresso Latino-Americano de Hidráulica, Córdoba, Argentina.

GATES, T.K et al. (1991). *Multicriterion Strategic Planning for Improved Irrigation Delivery. I e II: Approach e Application.* ASCE Journal of Irrigation and Drainage, Vol. 117, n.6, pp. 897 - 933, November/December.

GUIMARÃES V. S., et al. (1997) *O Uso do ADCP para Medição de Vazão e Estimativa do Fluxo de Sedimentos nos Grandes Rios da Bacia Amazônica.* In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Vitória-ES, Novembro.

HASHIMOTO, T. et al. (1982). *Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation.* Water Resources Research, Vol. 18, n. 1, pp. 14-20.

JAMIESON, D. G.; FEDRA, K. (1996). *The "WATERWARE" Decision-Support system for River Basin Planning. 1. Conceptual Design.* Journal of Hydrology, Vol. 177, pp. 163-175.

_____. (1996). _____. *2. Planning Capability.* Journal of Hydrology, Vol. 177, pp. 177-198.

_____. (1996). _____. *3. Example Applications.* Journal of Hydrology, Vol. 177, pp. 199-211.

JONES, I. J. (1979). *Hydro System Seasonal Regulation Program*, The National Workshop on Reservoir Systems Operations, University of Colorado, Boulder, Colorado, pp.13-17, August.

KJELDSEN, T. R.; ROSBJERG, D. (2001). *A Framework for Assessing the Sustainability of a Water Resources System. Regional Management of Water Resources.* In: 6th IAHS Scientific Assembly at Maastricht, Netherlands, July

LABADIE, J. W. et al. (1984). *Network analysis of raw supplies under complex water rights and exchanges: Documentation for program MODSIM3.* Colorado Water Resources Institute, Fort Collins, Colorado, EUA.

_____. (1986). *Network Model for Decision Support in Municipal Raw Water Supply*. Water Resources Bulletin, Vol. 22, n.6, December.

_____. (1999). *MODSIM: Modelo de Rede de Fluxo para Simulação de Bacias Hidrográficas - Manual Do Usuário e Estudos de Casos.* São Paulo, LabSid - EP - USP. Disponível em <http://www.phd.poli.usp.br/phd/pos/phd5029/>. Acesso em 03 Abr. 2003.

LAHDELMA, R. et al. (1998). *SMMA - Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis*. European Journal of Operational Research, Vol. 106, pp 137-143.

LIMA, G.; PEIXOTO, L. S.; MAUAD, F. F. (2001). *Modelos de Simulação no Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos.* In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Aracaju - SE, Novembro.

LIMA, G. (2002). *Aplicação de Simulação Computacional na Análise dos Conflitos Entre os Usos Múltiplos da Água na Bacia do Rio Atibaia no Estado de São Paulo.* Dissertação de Mestrado, 141 p., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.

LÍSBOA, H. et al. (2001). *Sistema e Suporte à Decisão em Engenharia de Recursos Hídricos: Desenvolvimento Piloto Para as Bacias dos Rios Paraguaçu e Itapicuru, no Estado da Bahia.* In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Aracaju - SE, Novembro.

LOÁICIGA, H. A., P. E. (2002). *Reservoir Design and Operation with Variable Lake Hidrology. Journal of Water Resources Planning and Management*, pp. 399 - 405, November/December.

MAIA; A. G.; Vilella, S. M. (2001). *Gerenciamento do Estoque de Água do Sistema de Múltiplos Reservatórios da Bacia do Paraguaçu.* In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Aracaju - SE, Novembro.

MAIER, H. R. (2001). *First-order reliability method for estimating reliability, vulnerability, and resilience*. Water resources research, Vol. 37, pp. 779-790, March.

MAUAD, F. F. (2000). *Planejamento Integrado de Recursos Hidroenergéticos: O Confronto de Usos Múltiplos da Água no Aproveitamento Hidroelétrico de Alqueva em Portugal. Tese de Doutorado*, 182 p., Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP.

_____. (2001). A *Utilização da Simulação Computacional no Conflito de Usos Múltiplos da Água*. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Aracaju - SE, Novembro.

MATZENAUER, H. B., JARDIM, S. B. (2001). *Estudo Comparativo das Metodologias MCDM e MCDA na Gestão dos Recursos Hídricos*. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Aracaju - SE, Novembro.

MICHALLAND, B. et al. (1997). *Bi-Objective Dynamic Programming for Trading Off Hydropower and Irrigation*. Applied Mathematics and Computation, Vol. 88, pp. 53-76.

MIZYED, N.R.; LOFTIS, J.C.; FONTANE, D.G. (1992). *Operation of Large Multireservoir Systems Using Optimal-Control Theory*, ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 118, n.4, pp. 371 - 387, July/August.

MOHAN, S.; RAIPURE, D. M. (1992). *Multiobjective Analysis of Multireservoir System*. Journal of Water resources Planning and Management, Vol. 118, pp. 356-370, July/August.

MOUSAVI, H.; RAMAMURTHY, A. S. (2000). *Optimal Design of Multi-Reservoir Systems for Water Supply*. Advances in Water Resources, Vol. 23, pp. 613-624.

OLIVEIRA, J. F. (1998). *Utilização do Solver do Excel.* DEEC, Universidade do Porto, Portugal. Maio. Disponível em <http://www.fe.up.pt/~jfo/ua/MQG_Util_Solver.pdf>. Acesso em 14 Ago 2003.

ORLOB, G. T. (1992). *Water-Quality Modeling for Decision Making.* Journal of Water resources Planning and Management, Vol. 118, n. 3, pp. 295-307, May/June.

PEIXOTO, L. S. (2002). *A Utilização de Simulação Computacional no Gerenciamento de Usos Múltiplos da Água na Bacia do Sapucaí/Grande no Estado de São Paulo.* Dissertação de Mestrado, 130 p., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.

PORTO, R. L. et al. (1997). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos.* Editora Universidade, UFRGS, ABRH, Porto Alegre - RS.

_____. (2001). *Sistema de Suporte a Decisões para a Operação dos Grandes Sistemas Produtores da Sabesp.* In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Aracaju - SE, Novembro.

ROBERTO, A. N. R., PORTO, R. L. (1999). *MODSIM P32: Manual do Usuário.* São Paulo, LabSid - EP - USP. Disponível em <http://www.phd.poli.usp.br/phd/pos/phd5029/>. Acesso em 03 Abr. 2003.

_____.(1999). *Alocação da Água entre Múltiplos Usos em uma Bacia Hidrográfica.* In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13 / Simpósio de Hidrologia Urbana e Drenagem, 4. Belo Horizonte, 1999. Água em quantidade e qualidade: o desafio do próximo milênio. Porto Alegre: ABRH.

SETTI, A. A. et al. (2001). *Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos.* OMM, ANA, ANEEL, Brasília - DF. Disponível em <http://www3.aneel.gov.br/EdicaoLivros2001reos.htm>. Acesso em 26 Jan. 2003.

SHELTON, R. A. (1979). *Management of TVA Reservoir Systems*, The National Workshop on Reservoir Systems Operations, University Of Colorado, Boulder, Colorado, pp. 13-17, August.

SONTEK (2003). *RiverSurveyor System Manual: Software Version 3.50.* San Diego - CA - EUA, Sontek YSI, Inc. Disponível em <http://www.sontek.com/product/sw/rivsurv/rssw.htm>. Acesso em 07 Jul. 2003.

STAHL, G.R.; ELLIOTT, J.C. (1999). *'New Generation' Computer Models for Risk-Based Water Planning and Management.* Water Supply, Vol. 17, n.3/4, Sidney, Australia, pp. 289 - 295.

STAM, A. et al. (1998). *An Interactive Reservoir Management System for Lake Kariba.* European Journal of Operational Research, Vol. 107, pp. 119-136.

SYLLA, C. (1995). *A Penalty-Based Optimization for Reservoirs System Management.* Computers and Industrial Engineering, Vol. 28, pp. 409-422.

TICKLE, K. S.; GOULTER, I. C. (1994). *Statistical Properties of Reliability and Resiliency Measures.* In: Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering, Vol. 4, pp. 209-220.

TUCCI, C. E. M. (Org.) (1998). *Modelos Hidrológicos.* 1ª Edição, Editora Universidade, UFRGS, ABRH, Porto Alegre - RS.

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

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. (1996). *Diretrizes para Elaboração de Dissertações e Teses na EESC - USP.* Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca. São Carlos - SP.

VEDULA, S., MUJUMDAR, P. P. (1992). *Optimal Reservoir Operation for Irrigation of Multiple Crops*. Water Resources Research, Vol. 28, n.1, pp. 1 - 9, January.

VOTRUBA, L. et al. (1998). *Developments in Water Science*. Analysis of Water Resource Systems. Nova York. Elsevier Science Publishing Company, Inc.

YEH, W. W-G. (1985). *Reservoir Management and Operations Models: a State-of-the-Art Review*. Water Resources Research, Vol. 21, n. 12, pp. 1797-1818, December.

Bibliografia Consultada

MAUAD, F. F.; ALBERTIN, L. L.; CORREA, C. R. R.; AGUIAR, A. R. B. & OLIVEIRA, H. R. (2003) *Avaliação de Conflitos de Usos Múltiplos de Água em Sistemas de Recursos Hídricos: O Estado da Arte* In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Curitiba - PR. Novembro. *Anais*: CD-ROM.

MAUAD, F. F.; OLIVEIRA, H. R.; CORREA, C. R. R. & MARIOTONI, C. A. (2003) *O Papel das Pequenas Centrais Hidrelétricas Frente à Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro* In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Curitiba - PR. Novembro. *Anais*: CD-ROM.

MAUAD, F. F.; OLIVEIRA, H. R.; CORREA, C. R. R.; VENANCIO, S. S.; SOUZA, L. B. S. & VILLELA, S. M. (2003) *Reavaliação do Potencial Hidrelétrico da Usina do Monjolinho, Localizada no Município de São Carlos - SP* In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Curitiba - PR. Novembro. *Anais*: CD-ROM

OLIVEIRA, H. R.; CORREA, C. R. R.; MAUAD, F. F. & MARIOTONI, C. A. (2003) *Considerações Acerca das Pequenas Centrais Hidrelétricas Brasileiras* In: X ELPAH - Encontro Latino-Americano e do Caribe em Pequenos Aproveitamentos Hidrelétricos, 2003, Poços de Caldas - MG. *Anais*: p. 115 - 120.

OLIVEIRA, H. R.; MAUAD, F. F. *Pequenas Centrais Hidrelétricas: Panorama Atual Brasileiro* In: SCHALCH, V. & WENDLAND, E. (Org.) (2003) Pesquisas em Meio Ambiente: Subsídios para a Gestão de Políticas Públicas, 1ª ed. Editora Rima, São Carlos - SP, v.2, p. 177-184.

Internet:

http://www.adtp.org.br (2003)
http://www.ambiente.sp.gov.br (2003)
http://www.aneel.gov.br (2003)
http://www.capes.gov.br (2003)
http://www.cdbrasil.cnpm.embrapa.br (2003)
http://www.cetesb.sp.gov.br (2003)
http://www.codevasf.gov.br (2003)
http://www.cptec.inpe.br (2003)
http://www.daee.sp.gov.br (2003)
http://www.dpi.inpe.br (2003)
http://www.eesc.sc.usp.br (2003)
http://www.eletrobras.gov.br (2003)
http://www.embrapa.br (2003)
http://www.fapesp.br (2003)
http://www.fcth.br (2003)
http://www.ibama.gov.br (2003)
http://www.inmet.gov.br (2003)
http://www.phd.poli.usp.br/labsid (2003)
http://www.mmá.gov.br (2003)
http://www.mme.gov.br (2003)
http://www.ons.org.br (2003)
http://www.phd.poli.usp.br (2003)
http://www.recursoshidricos.sp.gov.br (2003)
http://www.sabesp.com.br (2003)
http://www.sbpe.org.br (2003)
http://www.seade.gov.br (2003)
http://www.sigrh.sp.gov.br (2003)
http://www.snirh.gov.br (2003)
http://www.sontek.com (2003)
http://www.sectran.sp.gov.br (2003)
http://www.transportes.gov.br (2003)
http://www.tratamentodeagua.com.br (2003)

ANEXOS

Anexo A: Série de vazões afluentes à UHE Barra Bonita

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1931	934	1733	1175	730	541	396	306	253	366	314	320	820
1932	845	760	787	466	415	398	266	259	201	311	235	719
1933	637	520	381	261	281	225	191	159	181	201	155	267
1934	453	466	360	249	177	159	133	123	151	163	119	855
1935	**445**	**832**	**674**	**411**	**253**	**252**	**189**	**194**	**323**	**747**	**336**	**336**
1936	589	420	741	378	265	182	169	191	334	215	220	685
1937	1000	673	632	679	503	433	256	228	182	247	488	521
1938	539	443	473	365	298	253	328	228	236	394	345	538
1939	827	645	448	361	319	284	208	162	157	141	327	471
1940	867	1351	724	400	324	231	182	158	157	188	273	307
1941	457	285	293	256	155	138	155	123	250	356	399	541
1942	465	499	625	431	274	261	300	177	171	155	178	380
1943	465	558	551	314	198	190	160	147	169	302	322	290
1944	360	403	688	291	195	155	183	129	120	121	230	201
1945	245	579	359	234	176	361	321	169	159	144	307	362
1946	811	827	766	401	266	266	262	182	152	219	224	206
1947	789	1039	1194	498	370	304	302	280	360	357	308	782
1948	852	1005	982	595	414	310	267	273	203	204	278	283
1949	478	719	488	422	277	256	213	165	152	156	191	534
1950	710	1083	1017	536	349	317	257	186	164	243	277	369
1951	718	1083	917	519	332	277	254	198	171	208	273	377
1952	427	711	760	402	264	332	238	188	194	203	299	202
1953	371	422	256	331	200	183	155	161	161	191	224	286
1954	425	618	464	286	359	270	187	136	122	172	128	186
1955	497	233	308	219	155	151	146	155	159	134	253	291
1956	321	359	419	273	419	509	297	422	236	266	167	223
1957	722	741	637	502	302	250	347	290	635	443	489	492
1958	638	872	939	635	679	655	389	283	334	357	443	519
1959	812	647	612	542	330	256	202	238	164	195	253	439
1960	930	861	878	448	394	314	251	202	170	215	308	939
1961	**937**	**735**	**805**	**535**	**462**	**291**	**219**	**182**	**163**	**168**	**271**	**323**
1962	**392**	**688**	**1094**	**395**	**300**	**227**	**216**	**196**	**206**	**425**	**352**	**487**
1963	1194	841	459	258	192	179	139	109	95	175	227	145
1964	91	632	196	162	180	122	167	138	117	209	210	605
1965	1140	1260	1108	467	556	327	345	241	193	453	417	934
1966	**807**	**738**	**694**	**392**	**291**	**217**	**183**	**267**	**225**	**284**	**331**	**640**
1967	909	977	806	440	281	359	241	197	243	299	420	506
1968	876	429	447	316	252	217	172	169	125	156	105	228
1969	228	235	236	208	130	166	97	96	82	267	657	460
1970	966	1087	916	429	345	273	217	220	330	289	240	350
1971	392	233	419	261	213	341	235	168	159	310	172	298
1972	615	1040	484	337	223	178	295	273	277	816	498	410
1973	606	621	419	459	292	233	239	197	209	271	401	629
1974	906	518	911	467	264	378	231	150	151	236	222	574
1975	682	917	554	295	212	177	195	111	106	239	386	723
1976	750	1096	863	651	590	775	757	608	734	705	574	631
1977	979	693	478	666	319	308	198	167	255	215	282	767
1978	463	340	470	173	237	363	164	117	139	121	579	548
1979	515	409	325	222	308	167	171	240	350	294	367	469
1980	596	753	503	507	228	244	198	169	171	168	207	630
1981	943	359	287	252	181	207	145	118	78	327	544	541
1982	784	834	710	433	277	655	470	281	197	585	543	1241
1983	1341	1739	1254	983	1020	2334	756	476	1011	805	697	860
1984	892	533	353	422	360	195	174	285	350	194	221	465
1985	589	581	820	459	364	235	174	136	206	97	180	176
1986	285	507	627	299	295	160	142	301	145	142	241	992
1987	930	1117	648	418	798	881	399	270	305	298	289	414
1988	631	791	1002	626	600	553	283	198	170	350	341	410
1989	1311	1297	746	472	323	304	361	455	303	206	268	337
1990	1207	413	689	348	307	205	354	251	275	308	304	295
1991	615	1213	1409	1103	589	419	330	239	199	561	228	498
1992	347	380	563	388	380	179	165	146	277	378	626	577
1993	690	1093	677	458	339	439	221	224	512	425	236	287
1994	587	750	562	369	255	216	198	132	94	156	252	584
1995	788	2205	856	790	457	321	333	192	184	405	327	448
1996	1103	752	1272	443	319	247	205	186	420	442	389	600
1997	1054	1195	376	269	250	436	208	159	209	235	533	551
1998	**430**	**887**	**781**	**423**	**443**	**260**	**195**	**189**	**209**	**457**	**198**	**663**
1999	1403	1250	955	453	360	391	290	223	265	210	200	334
2000	622	709	482	279	204	187	220	218	362	216	400	547
2001	585	877	540	337	291	228	213	192	199	405	287	586
Mínimas	**91**	**233**	**196**	**162**	**130**	**122**	**97**	**96**	**78**	**97**	**105**	**145**
Médias	**702**	**776**	**667**	**424**	**335**	**326**	**248**	**210**	**237**	**294**	**318**	**496**
Máximas	**1403**	**2205**	**1409**	**1103**	**1020**	**2334**	**757**	**608**	**1011**	**816**	**697**	**1241**