Campus de São Carlos

A UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL NO GERENCIAMENTO DE
USOS MÚLTIPLOS DA ÁGUA NA BACIA DO
SAPUCAÍ/GRANDE NO ESTADO DE SÃO PAULO

Luciana Silva Peixoto

Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 03./05./02..

Ass.:.....

**A UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL
NO GERENCIAMENTO DE USOS MÚLTIPLOS DA
ÁGUA NA BACIA DO SAPUCAÍ/ GRANDE NO ESTADO
DE SÃO PAULO**

Luciana Silva Peixoto

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

31100036922

ORIENTADOR: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

São Carlos
2002

Class.	TESE-CEESC
Cutt.	14295
Tombo	10094/02

st 1238784

P379u Peixoto, Luciana Silva
A utilização de simulação computacional no gerenciamento de usos múltiplos da água na bacia do Sapucaí/Grande no Estado de São Paulo / Luciana Silva Peixoto. -- São Carlos, 2002.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.

Área: Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad.

1. Simulação computacional. 2. Usos múltiplos da água. 3. Recursos hídricos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheira **LUCIANA SILVA PEIXOTO**

Dissertação defendida e julgada em 03-04-2002 perante a Comissão Julgadora:

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

Aprovada

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

Aprovada

Prof. Tit. **CARLOS ALBERTO MARIOTONI**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADA

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

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*Dedico este trabalho aos
meus pais, grandes
incentivadores e responsáveis
pelo meu sucesso*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

Aos meus pais e familiares, pelo apoio recebido.

Ao Professor Frederico Fábio Mauad, pela orientação e confiança durante a elaboração deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP pela colaboração e auxílio.

Ao Higor Coelho Philippi pelo apoio, carinho e compreensão.

Às minhas amigas Adelena, Camila, Cáscia, Jucélia, Karina e Pattinha, pelos bons momentos passados juntas.

Aos colegas Leonardo Barra e Guilherme de Lima, pelo grande apoio e amizade.

Aos professores Varcily Queiroz Barroso e João Bosco Ladislau de Andrade, da Universidade do Amazonas, pela colaboração na etapa inicial do meu ingresso neste programa de pós-graduação.

À Companhia Paulista de Força e Luz, na pessoa do Sr. José Ferreira Abdal Neto, pelos materiais fornecidos, fundamentais para a realização deste estudo.

Ao Comitê da Bacia Hidrográfica do Sapucaí-Mirim/Grande, na pessoa do Sr. Reginaldo A. Branquinho Coelho, pela forma receptiva e gentil no fornecimento do Relatório Zero de grande contribuição neste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	iv
RESUMO	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. USOS DA ÁGUA	4
3. DESENVOLVIMENTO DE PEQUENAS CENTRAIS ELÉTRICAS NO BRASIL.....	5
4. REVISÃO DE LITERATURA	8
4.1. Introdução	8
4.2. Usos conflitantes da água	9
4.3. Sistemas de suporte à decisão	9
4.4. Modelos de Otimização	11
4.4.1. Programação Linear	12
4.4.2. Programação Dinâmica	13
4.4.3. Programação de Metas	14
4.5. Modelos de Simulação	15
4.6. Modelos de Simulação/Otimização	20
5. BACIA HIDROGRÁFICA DO SAPUCAÍ/GRANDE	22
5.1. Estudos anteriores realizados na Bacia do Sapucaí/Grande	22
5.1. Objetivos da construção das PCHs Palmeiras, Anhangüera e Retiro	23
5.3. Caracterização geral da bacia do Sapucaí/Grande	24

5.3.1. Localização	24
5.3.2. Morfologia e Relevo	28
5.3.3. Geologia e Pedologia	30
5.3.4. Clima	34
5.3.5. Hidrografia da bacia	37
5.3.6. Escoamento	38
5.3.7. Características sócio-econômicas	40
5.3.8. Indústria	41
5.3.9. Agricultura	42
5.3.10. Aproveitamentos hidrelétricos	43
5.3.11. Fontes de poluição	45
6. METODOLOGIA	48
6.1. Modelo de simulação computacional IRAS	48
6.1.1. Características do modelo	48
6.1.2. Dados de entrada	53
6.1.3. Políticas operacionais no modelo IRAS	53
6.1.4. Dados limites utilizados no modelo	56
6.1.5. Impressões de séries de tempo e de espaço	57
6.1.6. Indicadores dinâmicos	57
6.1.7. Indicadores estatísticos	58
6.1.8. Distribuições da probabilidade	59
6.2. Descrição do sistema utilizado	60
6.3. Levantamento de dados disponíveis	64
6.3.1. Localização e características dos reservatórios	64
6.3.2. Afluências	65
6.3.3. Consumo de água	66
6.4. Regras de operação e hipóteses consideradas	77
6.5. Dados limites utilizados no estudo	78
7. RESULTADOS	80

7.1. Distribuições da probabilidade da vulnerabilidade e da resiliência	89
8. CONCLUSÕES	96
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
10. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	111
11. ANEXOS	112

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo	25
FIGURA 2 – Bacia do Sapucaí/Grande	26
FIGURA 3 – Sub-bacias da UGRHI do Sapucaí/Grande	27
FIGURA 4 – Processo de interpolação utilizado no modelo IRAS	54
FIGURA 5 – Esquemas do sistema simulado	62
FIGURA 6 – Rede de nós e arcos do modelo IRAS utilizada no estudo (Cenário 1).	63
FIGURA 7 – Rede de nós e arcos do modelo IRAS utilizada no estudo (Cenário 2).....	63
FIGURA 8 – Localização dos aproveitamentos hidrelétricos em estudo	64
FIGURA 9 – Localização dos quatro postos utilizados na geração do Modelo Multivariado	66
FIGURA 10 – Alocação do consumo urbano e industrial (1) no modelo IRAS	68
FIGURA 11 – Alocação do consumo urbano e industrial (2) no modelo IRAS	69
FIGURA 12 – Alocação do consumo de irrigação no modelo IRAS (hipótese 1)	71
FIGURA 13 – Alocação do consumo de irrigação no modelo IRAS (hipótese 2)	71
FIGURA 14 – Alocação do consumo de irrigação no modelo IRAS (hipótese 3)	72
FIGURA 15 – Alocação do consumo à jusante no modelo IRAS (Cenário 2).....	73
FIGURA 16 – Dados de entrada para geração de energia elétrica	75
FIGURA 17 – Consumo por evaporação	76
FIGURA 18 – Regra de liberação do reservatório São Joaquim (Cenário 1)	77
FIGURA 19 – Metas de armazenamento para os reservatórios Dourados, São Joaquim, Palmeiras, Anhangüera e Retiro	78
FIGURA 20 – Entrada de dados das combinações utilizadas para as variáveis simuladas	79

FIGURA 21 – Valores limites da variável de afluência considerados para irrigação	79
FIGURA 22 – Índices de confiabilidade e resiliência no reservatório de Dourados	81
FIGURA 23 – Confiabilidade e resiliência no reservatório de São Joaquim	82
FIGURA 24 – Confiabilidade e resiliência para o consumo na irrigação	83
FIGURA 25 – Confiabilidade e resiliência para o consumo urbano e industrial 1	84
FIGURA 26 – Confiabilidade e resiliência para o consumo urbano e industrial 2	84
FIGURA 27 – Índices estatísticos para o consumo na geração de energia (Dourados)	85
FIGURA 28 – Índices estatísticos para o consumo na geração de energia (São Joaquim)	86
FIGURA 29 – Probabilidade em relação ao armazenamento de Dourados	90
FIGURA 30 – Probabilidade em relação ao armazenamento de São Joaquim	91
FIGURA 31 – Probabilidade em relação ao armazenamento de Anhanguera	92
FIGURA 32 – Probabilidade de afluências para a irrigação	93
FIGURA 33 – Probabilidade de afluências em relação ao consumo urbano e industrial (1)	94
FIGURA 34 – Probabilidade de afluências em relação ao consumo urbano e industrial (2)	95
FIGURA 35 – Postos fluviométricos utilizados na geração de vazões	114
FIGURA 36 – Comparação das séries para o Posto Fazenda Velha	118
FIGURA 37 – Comparação das séries para o Posto Buriti	118

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Situação das PCHs, em operação, no Brasil	07
TABELA 2 – Precipitação Média Mensal (em mm)	35
TABELA 3 – Temperaturas Médias Mensais, em °C	36
TABELA 4 – Umidade Relativa (%)	37
TABELA 5 – Demanda /Disponibilidade Hídrica Superficial	39
TABELA 6 – Disponibilidade Hídrica Subterrânea (m ³ /h)	40
TABELA 7 – População total da UGRHI do Sapucaí/Grande	40
TABELA 8 – Distribuição das indústrias por ramo de atividades	41
TABELA 9 – Aproveitamentos hidrelétricos na UGRHI 08	44
TABELA 10 – Combinações alternativas de cor associadas às zonas de valores variáveis	56
TABELA 11 – Aproveitamentos hidrelétricos no Rio Sapucaí	61
TABELA 12– Dados Principais das PCH em operação	65
TABELA 13 – Dados Principais das PCH em projeto básico	65
TABELA 14 – Demandas cadastradas na UGRHI 08 (CBH/SMG).....	67
TABELA 15 – Demandas cadastradas na UGRHI 08 (PERH)	67
TABELA 16 – Demandas de água utilizadas no modelo IRAS	68
TABELA 17 – Distribuição mensal dos consumos	70
TABELA 18 – Distribuição mensal da evaporação (mm)	76
TABELA 19 – Índices de confiabilidade e resiliência para o cenário 1	87
TABELA 20 – Índices de confiabilidade e resiliência para o cenário 2	88
TABELA 21 – Séries de vazões geradas	120
TABELA 22 – Valores iniciais utilizados no IRAS	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CBH/SMG – Comitê da Bacia Hidrográfica do Sapucaí-Mirim/Grande

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CESP – Companhia Energética do Estado de São Paulo

CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo

DENI – Divisão de Recursos Hídricos e Inventário

DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

HEC – Hydrologic Engineering Corps

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

IRAS – Interactive River-Aquifer Simulation

PCHs – Pequenas Centrais Hidrelétricas

PNPCH – Programa Nacional de Pequenas Centrais Hidrelétricas

SEADE – Secretaria de Economia e Planejamento do Governo do Estado de São Paulo

SIPOT – Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico

SSD – Sistema de Suporte à Decisão

UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

RESUMO

PEIXOTO, L. S. (2002). *A utilização de simulação computacional no gerenciamento de usos múltiplos da água na bacia hidrográfica do Sapucaí/Grande no Estado de São Paulo*. São Carlos, 2002. 130p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

É indiscutível a importância da disponibilidade hídrica, tanto quantitativa como qualitativa, no desenvolvimento adequado de uma região. Não só o déficit desse recurso como também o seu excesso são igualmente problemáticos e devem ser vistos de uma maneira mais realista e séria. Portanto, são necessárias ações eficientes referentes ao planejamento e gestão dos recursos hídricos, a fim de garantir a disponibilidade da água, visando à proteção, à recuperação e à conservação desse recurso. Neste estudo, busca-se analisar os conflitos gerados no aproveitamento de usos múltiplos da água em uma bacia hidrográfica do Estado de São Paulo, considerando-se o cenário atual e o futuro, com a implementação de três pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). Através da aplicação de um modelo de simulação computacional são calculados índices de desempenho, ou seja, a confiabilidade, a resiliência e a vulnerabilidade, do sistema.

Palavras-chave: simulação computacional; usos múltiplos da água; recursos hídricos.

ABSTRACT

PEIXOTO, L. S. *The use of computational simulation in the management of water multiple uses in the river basis of the Sapucaí/Grande in the State of São Paulo*. São Carlos, 2002. 130p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

It's unquestionable the importance of the water availability, both quantitative and qualitative, in the appropriate development of a region. Not only the deficit of this resource as its excess are equally problematic and must be seen in a more realistic and serious way. Therefore, efficient actions regarding the water resources' planning and management are necessary, to guarantee the availability of water, aiming the protection, recovery and conservation of this resource. In this work has the aim of analyzing the conflicts generated in the multipurpose reservoir system, in a basis of the State of São Paulo, considering the current and future scenarios, with the implementation of three small hydroelectric power stations. Through the application of a computational simulation model, the reliability, resilience and vulnerability of the system are estimated.

Keywords: computational simulation; water multiple uses; water resources.

1. INTRODUÇÃO

No início do desenvolvimento das primeiras civilizações, as pequenas necessidades hídricas podiam ser atendidas pelas disponibilidades naturais sem maiores investimentos que aqueles necessários para a captação de água. O aumento populacional e do próprio desenvolvimento econômico acabaram por reduzir as disponibilidades em alguns locais e por tornar atraentes outras regiões carentes de água, exigindo maiores investimentos para obtê-las (PORTO et al., 1997).

O desenvolvimento da humanidade está associado aos usos da água e, durante milênios, o homem considerou-a como um recurso infinito. A idéia de que a água seja um recurso renovável e infinito, tem sido substituída pela percepção, cada vez mais generalizada, de que o modelo atual de desenvolvimento da economia, a degradação do meio ambiente e as políticas associadas ao recurso “água” no planeta, têm aproximado a sua disponibilidade de uso ao limite imposto pela natureza.

Devido ao crescimento acelerado do consumo, gerando escassez, e a poluição crescente com comprometimentos de várias bacias, limitando os mananciais, muitos países do mundo vêm sofrendo com problemas hídricos, sendo inevitável o planejamento e gerenciamento dos seus recursos hídricos. A falta de água já atinge com muita severidade países como o Kuwait, Egito, Arábia Saudita, Israel, Jordânia, entre outros.

O esgotamento dos recursos naturais de água tem sido provocado pelo desenvolvimento desordenado das cidades, pela ocupação de áreas de mananciais e pelo crescimento populacional, levando as populações a buscarem novas fontes de captação. A escassez hídrica é resultado do mau uso da água, do desmatamento, da poluição, do

desperdício, da falta não só de políticas públicas que estimulem o uso sustentável, como também de participação da sociedade e da educação ambiental (REDE DAS ÁGUAS, 2002).

As demandas consuntivas¹ (abastecimento doméstico e industrial, irrigação e outros) cresceram em taxas consideráveis com pouca preocupação em combater os desperdícios e sem racionalização dos usos em termos de quantidade e qualidade.

Em razão de ser a água um recurso natural indispensável à piscicultura, à navegação, à geração de energia elétrica, à manutenção da flora e da fauna e ao equilíbrio dos ecossistemas, os usos não consuntivos² também são importantes para o bem estar social e econômico das populações.

A sociedade moderna ampliou consideravelmente a diversidade de usos das águas. O quadro tornou-se complexo com o aparecimento de demandas conflitantes. A realidade nos mostra que as disponibilidades hídricas precisam ser ampliadas e, para tanto, são necessários investimentos em pesquisas e desenvolvimento tecnológico para exploração viável e racional dos recursos hídricos.

A água num ecossistema varia de forma quantitativa e qualitativa com o tempo e no espaço. A demanda de água atende usos múltiplos, variando sazonalmente e de forma não totalmente previsível. A variabilidade temporal, espacial, quantitativa e qualitativa, tanto da disponibilidade, como da demanda, leva à necessidade de estudos complexos de planejamento e gestão dos recursos hídricos.

No Brasil, segunda maior potência mundial em termos de reserva de água doce, encontra-se situações de seca, como no interior do Nordeste, semelhante as dos países que praticamente não têm água. A situação da escassez hídrica em certas regiões do Brasil é delicada e a falta de uma política de gerenciamento dos recursos hídricos em muitos estados, vem acarretando déficit na oferta de água.

¹ Referem-se aos usos que retiram a água de sua fonte natural diminuindo suas disponibilidades quantitativa, espacial e temporal.

² Referem-se aos usos que retornam à fonte de suprimento, praticamente a totalidade da água utilizada, podendo haver alguma modificação no seu padrão temporal de disponibilidade quantitativa.

Algumas regiões do Estado de São Paulo apresentam um quadro crítico de déficit de oferta hídrica, trazendo transtornos à população, sendo necessárias medidas de planejamento e gestão para o uso conjunto dos recursos hídricos, minimizando o conflito em relação a este bem comum, ou seja, a água.

Este estudo apresenta a aplicação de um modelo de simulação computacional como ferramenta na análise do conflito de usos múltiplos da água, utilizando um caso de estudo real. São calculados os indicadores de desempenho do sistema, ou seja, a confiabilidade³, a resiliência⁴ e a vulnerabilidade⁵ para os cenários considerados. O objetivo principal deste trabalho é analisar os conflitos gerados na bacia hidrográfica do Rio Sapucaí, com a implantação de três pequenas centrais hidrelétricas (PCHs).

³ Confiabilidade: capacidade de um sistema desempenhar suas funções, sem falhas ou avarias, sob certas condições e dentro de um período determinado.

⁴ Resiliência: capacidade de um sistema de recuperar-se rapidamente de uma falha e retornar à normalidade dentro de um intervalo específico de tempo.

⁵ Vulnerabilidade: representa a magnitude (dimensão) de uma falha de um dado objetivo.

2. USOS DA ÁGUA

A água é utilizada de diversas maneiras e em várias atividades, dependendo da sua disponibilidade, da realidade sócio-econômica e cultural, das formas de captação, tratamento e distribuição (REDE DAS ÁGUAS). Os principais usos da água são:

- Abastecimento público: compreende o uso doméstico (no preparo de alimentos, higiene pessoal, limpeza na habitação, entre outros) e o uso público (moradias, escolas, hospitais e demais estabelecimentos públicos, irrigação em parques e jardins, combate a incêndios, etc.);
- Industrial: como matéria-prima, na produção de alimentos e produtos farmacêuticos, gelo e etc., na metalurgia onde a água é utilizada na refrigeração, em abatedouros e matadouros, entre outros;
- Comercial: em escritórios, oficinas, nos centros comerciais e lojas, em bares e restaurantes, sorveterias, etc.;
- Agrícola e pecuário: na irrigação para produção de alimentos, para tratamento de animais, lavagem de instalações, máquinas e utensílios;
- Recreacional: em atividades de lazer, turismo, nos lagos, parques, rios, etc.;
- Geração de energia: na produção de energia elétrica;
- Saneamento: na diluição e tratamento de efluentes;
- Manutenção da vida aquática: garantia do equilíbrio dos ecossistemas.

3. DESENVOLVIMENTO DE PEQUENAS CENTRIAS ELÉTRICAS NO BRASIL

Segundo MAUAD (1995), historicamente, o desenvolvimento industrial brasileiro sempre esteve ligado ao desenvolvimento das centrais hidrelétricas, particularmente às de pequeno porte, ou seja, as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). A entrada da hidroeletricidade no Brasil se deu no ano de 1883, com a implantação da central hidrelétrica do Ribeirão do Inferno, em Diamantina, Minas Gerais. Ela era constituída de uma barragem de alvenaria de pedra e um pequeno canal, que proporcionava um desnível de 5 m. A casa de força era formada por dois geradores de cerca de 6 kW cada, acionados por uma roda d'água de madeira. No ano de 1888, foi instalada a central de Marmelos, no município de Juiz de Fora, MG, com dois geradores monofásicos de 125 kW cada. Essa central é considerada a Usina "Zero", por marcar o fim das ações isoladas. Ela tinha a função de atender as fábricas de tecido e a iluminação pública do município. E, assim, de forma descentralizada, em virtude de seu potencial hidráulico disponível, o parque de geração brasileiro cresceu, quase que totalmente baseado nos recursos hídricos.

Na década de 50, com a construção de centrais em Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul, o país entrou num ciclo de desenvolvimento acelerado que coincidiu com a criação das companhias de eletricidade estaduais, que passaram a gerenciar os projetos e construções das grandes centrais hidrelétricas. Essas grandes companhias estaduais acabaram absorvendo as pequenas empresas privadas que atuavam regionalmente. Nessa época, devido às conjunções política, social e econômica, deu-se ênfase aos grandes empreendimentos, como a construção de grandes centrais hidrelétricas, coincidindo com o fechamento de um grande número de PCHs, sob a alegação de serem antieconômicas. Como resultado disso, o

Brasil, que chegara a contar com mais de mil e oitocentas PCHs, gerando aproximadamente 1.110 MW, entrou em um processo de desativação da geração descentralizada, levando, até a década de 80, ao abandono cerca de 1.400 centrais de pequeno porte.

Em 1983, foi lançado o Programa Nacional de Pequenas Centrais Hidrelétricas – PNPPCH, que tinha como objetivo o desenvolvimento de uma tecnologia nacional para viabilizar um novo ciclo de implantação das pequenas centrais, bem como o incremento e a modernização da indústria nacional de componentes e de equipamentos de geração hidrelétrica, com tecnologia adequada aos pequenos potenciais. Entretanto, somente no final da década de 90, com a reestruturação do setor elétrico nacional, com o surgimento das figuras do Produtor Independente⁶ e do Autoprodutor⁷, do direito do Transporte de Energia e com as privatizações das principais concessionárias, é que as PCHs passaram a ser encaradas como negócio viável.

Em virtude das características do potencial hidráulico do Brasil, cerca de 97 % da geração de energia elétrica brasileira é fornecida por centrais hidrelétricas. O sistema elétrico brasileiro está atualmente dividido em três sub-sistemas distintos: Sistema Interligado Sul/Sudeste/Centro-Oeste, Sistema Interligado Norte-Nordeste e os Sistemas Isolados. Entre as fontes de geração que integram os sistemas isolados, as PCHs apresentam o maior porte em termos de capacidade total instalada e de número de unidades em operação. Porém, foi a partir da Lei 9.648 de 27 de maio de 1998, que ampliava o conceito das PCHs de 10 MW para 30 MW, que este mercado passou a despertar maior interesse. Em 4 de dezembro de 1998, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução 394, que caracterizou como PCHs, centrais com potência total instalada de 30 MW e área inundada máxima de reservatório de 3 km² (ROSA & VIANA, 1999).

⁶ É a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio, que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida por sua conta e risco.

⁷ É a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão e autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu próprio uso.

Na tabela 1, a situação das PCHs, em operação, no Brasil é apresentada.

TABELA 1 – Situação da PCHs, em operação, no Brasil.

Situação	Quantidade			Potência (MW)		
	< 10 MW	10 a 30 MW	Total	< 10 MW	10 a 30 MW	Total
Serviço Público	267	41	308	667,7	783,4	1451,1
Auto Produtor	65	3	68	140,2	28,9	169,1
Produtor Independente	3	1	4	12,7	25	37,7
Total	335	45	380	820,6	837,3	1657,9

Fonte: ANEEL (censo de 1998).

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Introdução

A pesquisa operacional foi uma técnica introduzida durante a Segunda Guerra Mundial para a solução de problemas de operações militares, daí seu nome. Trata-se, em última análise, da aplicação do método de Descartes na solução de problemas complexos. Desde sua introdução, a pesquisa operacional vem se desenvolvendo e sendo aplicada no âmbito civil nas mais diversas modalidades. Deve-se ao “Harvard Water Program” a ação pioneira de introduzir esse tipo de abordagem em planejamento e gestão dos recursos hídricos. No processo de escolha da alternativa ótima, ao longo dos anos, várias técnicas foram desenvolvidas, sendo as mais conhecidas: a programação linear; a programação dinâmica; e a simulação computacional. O número de variações existentes na literatura é bastante extenso. A aplicação em casos reais de engenharia não é tão extensa, mas suficiente para garantir a sua viabilidade. A simulação, por outro lado, é a técnica mais largamente utilizada na prática, e apesar de não ser otimizante, proporciona meios para o tratamento detalhado do comportamento de sistemas (BRAGA, 1987).

YEH (1985) apresenta uma extensa revisão dos diversos modelos de operação e dimensionamento de reservatórios desenvolvidos e aprimorados, para solucionar problemas de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. O pesquisador discute os modelos de otimização (programação linear, programação não-linear e programação dinâmica) e simulação.

São apresentadas, a seguir, as ferramentas disponíveis na área tecnológica para o planejamento e gerenciamento do uso racional do recurso “água” e diversas pesquisas desenvolvidas em alguns países.

4.2. Usos conflitantes da água

A consideração explícita de objetivos múltiplos em tomadas de decisão está se tornando cada vez mais importante em análise de sistemas de recursos hídricos. Objetivos conflitantes como irrigação, controle de cheia, produção de energia, preservação ambiental, entre outros, são inevitáveis embora as alternativas de operação sejam derivadas de uma maneira eficiente, para qualquer sistema de recursos hídricos complexo (MOHAN & RAIPURE, 1992).

Os conflitos entre demandas hídricas para produção de energia, desenvolvimento de irrigação nas planícies canadenses e o fornecimento disponível foram revisados por GOULTER et al. (1983). A região de planície do Canadá consiste em grande parte de três províncias agrícolas: Alberta, Saskatchewan e Manitoba. Os graves conflitos de alocação de água dentro da região de planície canadense são resultado não só da distribuição de água entre suas indústrias concorrentes, energia e agricultura; como também do desequilíbrio geográfico entre fornecimento e demanda. Esta questão geográfica refere-se ao fornecimento de água existente nas regiões do norte, em contraposição à demanda agrícola centrada nas regiões do sul.

4.3. Sistemas de suporte à decisão

Atualmente, os avanços na tecnologia da computação, aliados ao aumento de complexidade nos problemas de gerenciamento de recursos hídricos, têm estimulado a prática maior de modelos matemáticos como ferramentas para auxiliar as tomadas de

decisão. Aparentemente, o que é necessário é uma reunião integrada de modelos, dados e rotinas de interpretação, que processa eficientemente dados de entrada e expõe os resultados em formato fácil de ser interpretado. Tal conjunto pode ser chamado de Sistemas de Apoio à Decisão (BRAGA et al., 1998).

ESCHENBACH et al. (2001) descreveram as capacidades de otimização do sistema de suporte à decisão RiverWare e seu uso pelos programas operacionais da Autoridade do Vale do Tennessee. O RiverWare é uma ferramenta flexível de modelagem de bacia hidrográfica que permite aos engenheiros de recursos hídricos não só simular mas também otimizar o gerenciamento de sistemas de reservatórios de múltiplos objetivos para operações diárias. Os dados de entrada necessários incluem características físicas e econômicas do sistema, metas de política de liberação priorizadas e parâmetros de linearização automática.

ITO et al. (2001) desenvolveram um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) para integrar processos hidrológicos e avaliação de risco das alternativas de planejamento de recursos hídricos. O SSD, chamado CTIWM (CTI Water Management), foi aplicado na bacia hidrográfica do Rio Chikugo, no Japão. As funções principais do CTIWM são: organizar e processar dados de vazão e de demanda de água, simular operação de reservatórios, estimar precipitação média e escoamento na bacia, e executar análises de risco para o planejamento a médio e curto prazo.

AZEVEDO et al. (1998) descreveram o desenvolvimento de um sistema de apoio a decisão (SAD) para integração de objetivos de quantidade e qualidade da água no gerenciamento de sistemas de aproveitamento de recursos hídricos. O SAD combina um modelo de qualidade de águas superficiais (QUAL2E) e um modelo de simulação de rede de fluxo (MODSIM) em uma interface amigável. O modelo foi aplicado à bacia do rio Piracicaba, no Estado de São Paulo. Um conjunto inicial composto de seis cenários foi considerado, representando diferentes combinações de operação do sistema Cantareira, aumentando-se as descargas de jusante e o nível de tratamento de efluentes na bacia. Duas alternativas, que se revelaram superiores às demais, foram selecionadas após a análise dos

resultados das simulações realizadas. A segunda etapa compreendeu a análise das alternativas escolhidas para condições projetadas para o ano 2010. Em seguida, analisou-se, em separado, a operação dos reservatórios. E, finalmente, compôs-se o cenário final de simulação, através da combinação da melhor alternativa de operação dos reservatórios com a melhor alternativa obtida na segunda etapa. Os resultados demonstraram que a solução dos graves problemas da bacia exigirão um aumento nos níveis de tratamento de efluentes urbanos e industriais, assim como eventual aumento na oferta de água.

4.4. Modelos de Otimização

YEH & BECKER (1982) desenvolveram procedimentos práticos de otimização para análise de usos múltiplos, sistema de reservatório de instalações múltiplas para guiar decisões em tempo real sobre operação de sistema. Aplicações foram feitas no Projeto do Vale Central (PVC) da Califórnia, nos Estados Unidos, que apresentam cinco usos, tratados aqui como objetivos: (1) produção de energia, (2) proteção de peixe, (3) manutenção da qualidade da água, (4) abastecimento de água, e (5) recreação.

LOUCKS & FALKSON (1970) apresentaram uma revisão e uma comparação de três modelos matemáticos: programação dinâmica, programação linear e política iterativa de programação dinâmica-linear. A forma de solução e algumas das vantagens, limitações e eficiências computacionais de cada um dos modelos e seus algoritmos são comparados através de um exemplo numérico simplificado. Os modelos são discretos, desde as variáveis contínuas de tempo, de volume e de vazão são aproximadas por unidades discretas.

BECKER & YEH (1974) apresentaram uma metodologia que envolve não só a utilização de uma forma de programação dinâmica (PD) para seleção de uma política ótima de armazenamento de reservatório, como também uma rotina de programação linear (PL), usada para otimização em períodos hidrológicos. A metodologia foi aplicada a um sistema

real de reservatórios e geração de energia associado aos sub-sistemas Shasta e Trinity do Projeto do Vale Central da Califórnia.

GRYGIER & STEDINGER (1985) compararam três algoritmos para otimização da operação de hidrosistemas de múltiplos reservatórios sobre período médio. Os algoritmos considerados foram: (1) uma combinação de programação linear e programação dinâmica (PL-PD) desenvolvida por BECKER & YEH (1974), (2) um algoritmo de controle ótimo e, (3) programação linear sucessiva (PLS). Dos três algoritmos considerados, apenas o PLS e o algoritmo de controle ótimo encontraram regularmente uma política determinística ótima, dentro de um período pré-determinado.

4.4.1. Programação Linear

MOHAN & RAIPURE (1992) aplicaram um modelo de programação multiobjetivo linear para análise de alternativas operacionais para uma bacia fluvial e utilizaram o método das restrições para derivar as liberações ótimas para vários objetivos de um sistema de múltiplos reservatórios da bacia do rio Chaliyar, em Kerala, na Índia. O sistema abrange cinco reservatórios que têm de ser operados para encontrar várias demandas conflitantes de irrigação, geração de energia elétrica, abastecimento de água para consumo humano, mantendo a qualidade ambiental. Os dois objetivos considerados pelo modelo foram a maximização de liberação para irrigação e a maximização de produção de energia, sujeitos a restrições sobre limitações físicas, restrições ambientais e continuidade de armazenamento. O modelo foi aplicado em três séries de aflúências representando as condições normais, de seca e de fluxo excessivo.

MOY et al. (1986) formularam um modelo de programação multiobjetiva linear inteira ou mista, incorporando a confiabilidade, a resiliência e a vulnerabilidade como objetivos. O modelo tem como principal objetivo identificar a política de liberação de um reservatório que visa atender um único uso, ou seja, o abastecimento de água. Os pesquisadores, através

do modelo multiobjetivo desenvolvido, otimizaram as medidas de desempenho e estabeleceram relações entre elas. Uma formulação mais aperfeiçoada do modelo criado por MOY et al. (1986) foi desenvolvida por SRINIVASAN et al. (1999). O aperfeiçoamento foi feito em termos de uma representação mais completa do indicador de desempenho “resiliência”. Além disso, um conjunto de restrições foi incluído à formulação, a fim de identificar e controlar a água em excesso que verte pelo reservatório.

Segundo BRAGA (1987), o exemplo pioneiro de aplicação da programação linear no planejamento de uso múltiplo da água é o plano Hibrace (DAEE, 1968). Neste plano, contempla-se um sistema constituído de 31 reservatórios, entre existentes e projetados, para regularização e controle de recursos hídricos da região metropolitana de São Paulo.

MEDEIROS (1985) analisa a aplicabilidade de programação linear mista ou inteira com variáveis 0 ou 1 no plano de aproveitamento múltiplo de recursos hídricos da bacia do Alto Tietê e bacias vizinhas, visando o abastecimento de água, o saneamento, o controle de poluição, o controle de enchente, a irrigação e a geração de energia elétrica, para atender a demanda da Grande São Paulo.

4.4.2. Programação Dinâmica

Vários modelos para definição da política operacional de reservatórios têm sido desenvolvidos, utilizando a programação dinâmica.

CHANDRAMAULI & RAMAN (2001) desenvolveram um modelo de rede neural baseado em programação dinâmica (RNPd) e aplicaram-no em um sistema de múltiplos reservatórios chamado de sistema “Parambikulan Aliyar Project”, localizado em Tamil Nadu e Kerala. O objetivo do trabalho foi estudar a capacidade da rede neural na derivação de políticas operacionais para sistemas de múltiplos reservatórios. Além disso, o desempenho do modelo RNPd é comparado com o modelo que usa regressão linear múltipla para derivação de políticas operacionais.

SOARES (1988) considera um problema de operação ótima multiobjetiva de um sistema de recursos hídricos, com dois objetivos conflitantes, a geração de energia elétrica e o uso de água para irrigação. A solução ótima é obtida pela Programação Dinâmica Estocástica. O modelo é aplicado para o sistema hidroelétrico do rio São Francisco, na região nordeste do Brasil. Como resultado, são apresentadas as curvas de risco de perda de energia versus irrigação e perda de energia média versus irrigação.

A maior desvantagem da PD é o problema da dimensionalidade que limita as capacidades desta técnica. Vários pesquisadores estudaram o problema da dimensionalidade. MOHAMMADI & MARIÑO (1984) apresentam alguns: LARSON & KECKLER (1969) que usaram a PD para calcular a operação horária de um sistema de 4 reservatórios, objetivando a minimização do custo de operação diária, MEREDITH (1975) que fez uso da PD diferencial discreta para obter a política de liberação para um conjunto de reservatórios ligados em série e TAUXE et al. (1980) que formularam um modelo de PD para múltiplos objetivos para obter as liberações mensais para um único reservatório.

4.4.3. Programação de Metas

JONG (1988) revisa e quantifica aproximadamente os parâmetros de fornecimento e de demanda e, em seguida, passa a analisar quatro cenários de planejamento de recursos hídricos conforme quatro estratégias diferentes. A abordagem multiobjetiva usa a Programação de Metas ("Goal Programming"), que fornece aos tomadores de decisão as informações necessárias e suficientes para o uso de bons julgamentos em escolhas racionais dentro de várias estratégias do desenvolvimento hídrico da região do Conselho de Cooperação do Golfo (C. C. G.), composta pelos Estados do Kuwait, de Bahrain, de Qatar, o Reino da Arábia Saudita, os Emirados Árabes Unidos e o Oman.

4.5. Modelos de Simulação

MARTIN (1983) desenvolveu um procedimento computacional para resolver o problema de obtenção mais proveitosa da operação em período longo de um sistema de recursos hídricos, assim como satisfazer os objetivos de abastecimento de água, manutenção da vazão e geração de energia hidroelétrica, enquanto satisfatórias as restrições operacionais do sistema. O algoritmo, como codificado nos programas AL-V e SIM-V, foi aplicado a um sistema em grande escala de 27 reservatórios nos Rios Red, White e Arkansas, nos Estados Unidos.

ACKOFF⁸ & MAASS et al.⁹ apud YEH (1985) definem a simulação como sendo uma técnica de modelagem que é usada para aproximar o comportamento de um sistema no computador, representando todas as características do sistema em grande parte por uma descrição algébrica ou matemática. Segundo YEH (1985), é diferente de uma técnica de programação matemática. Técnicas de programação matemática encontram uma decisão ótima para operação do sistema satisfazendo todas as restrições do sistema enquanto maximiza ou minimiza algum objetivo. Por outro lado, o modelo de simulação fornece a resposta do sistema para certas entradas que incluem regras de decisão, de modo que permita um tomador de decisões examinar as conseqüências de vários cenários de um sistema existente ou um novo sistema sem na realidade construí-lo. BEARD¹⁰ apud YEH (1985) descreve o modelo de simulação típico para um sistema de recursos hídricos como simplesmente um modelo que simula a operação do sistema intervalo por intervalo com

⁸ ACKOFF, R. L. (1961). *Progress in Operations Research*, Vol. 1, John Wiley, New York. Vozes apud YEH, W. W-G. (1985). Reservoir management and operation models: a state of the art review. *Water Resources Research*, v. 21, n. 12, p. 1797-1818.

⁹ MAASS, A., et al. (1962). *Design of Water-Resource Systems*, Harvard University Press, Cambridge, Mass. Vozes apud YEH, W. W-G. (1985). Reservoir management and operation models: a state of the art review. *Water Resources Research*, v. 21, n. 12, p. 1797-1818.

¹⁰ BEARD, L. B. (1972). Status of water resources systems analysis, paper presented at Seminar on Hydrological Aspects of Project Planning, Hydrol. Eng. Cent., U. S. Army Corps of Eng., Davis, Calif. Vozes apud YEH, W. W-G. (1985). Reservoir management and operation models: a state of the art review. *Water Resources Research*, v. 21, n. 12, p. 1797-1818.

afluências especificadas em todas localizações durante cada intervalo, características do sistema especificadas e regras operacionais especificadas.

CUNNINGHAM & AMED (1986) apresentaram uma simulação computacional interativa como uma ferramenta de suporte a decisão para treinamento de operadores de sistemas de recursos hídricos complexos, a fim de definirem uma política operacional efetiva. Além disso, os pesquisadores discutiram a inter-relação entre simulação interativa e técnicas tradicionais de modelagem de sistemas quantitativos.

O objetivo da simulação é não só representar e operar o sistema de forma mais detalhada possível como também fornecer informações para avaliar o comportamento real do sistema. Ao contrário dos modelos otimizantes, os modelos de simulação não determinam a política ótima de operação do reservatório. A solução ótima é encontrada iterativamente, processando-se diversas simulações alternativas e comparando desempenhos. Um modelo de simulação para operação do sistema de reservatórios do Alto Tietê foi desenvolvido para atender a três usos conflitantes: controle de cheias, abastecimento público e manutenção de vazão mínima (BRAGA et al., 1998).

LOUCKS & DORFMAN (1975) compararam e avaliaram várias regras de decisão linear usadas em modelos probabilísticos restritos para estimativa eficiente de políticas de operação e capacidades de reservatório. Foi assumido neste estudo que em alguns casos estes modelos probabilísticos restritos podem ser apropriados para aproximação preliminar de projeto e alternativas da política operacional. Várias regras específicas foram usadas para desenvolver e resolver modelos de problemas de reservatório simples. Para avaliar o desempenho de cada regra de decisão, utilizaram técnicas de simulação.

MAUAD (2000) apresentou os resultados da simulação computacional do aproveitamento de fins múltiplos de Alqueva em Portugal. O sistema simulado inclui os rios Guadiana e Ardila, a barragem de Alqueva e o açude de Pedrogão. Utilizou-se o modelo de simulação Interactive River-Aquifer Simulation (IRAS) para determinação da resiliência, confiabilidade e vulnerabilidade do sistema para os diversos usos da água.

Os engenheiros do Hydrologic Engineering Corps (HEC) têm desenvolvido alguns pacotes computacionais amplamente usados em todo o mundo no dimensionamento de sistemas de múltiplos reservatórios. Um desses pacotes é o HEC-5 (1976), que possibilita o dimensionamento de sistemas de uso múltiplo incluindo geração de energia, controle de cheias, navegação e recreação. Outro modelo bastante conhecido e utilizado é o SIMYLD-II (Texas Water Development Board, 1970). Este modelo é semelhante ao HEC-5, com a sofisticação de utilização de um algoritmo otimizador para definir a política operacional para cada intervalo de tempo. O objetivo do algoritmo é a minimização de custos operacionais. Um terceiro modelo disponível é o ACRES (Sigvaldason, 1976), resultado de uma adaptação e extensão dos métodos de operação utilizados no HEC-5 e SIMYLD-II (BRAGA, 1987).

SIGVALDASON (1976) descreveu um modelo matemático usado para avaliar políticas alternativas de operação do sistema do Rio Trent em Ontário, Canadá. O sistema é usado para controle de cheia, abastecimento de água, geração de energia e aumento de fluxos através do sistema de canal durante o período de verão. Para ajudar na avaliação do impacto de políticas alternativas, um modelo de simulação foi desenvolvido e aplicado. O modelo matemático usou algoritmo “out-of-kilter” como a principal rotina para derivação de decisões operacionais ótimas. Uma das principais características do algoritmo “out-of-kilter” é a representação do sistema como um conjunto de nós e ligações conectadas em forma de rede.

Segundo SRINIVASAN et al. (1999), falhas em operação de sistemas de reservatório de abastecimento de água são frequentemente inevitáveis durante períodos hidrológicos críticos. As características de falhas de cada sistema podem ser representadas pelos indicadores de desempenho tais como confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. Em outras palavras, confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade juntos caracterizam “risco” no contexto de operação e planejamento de reservatório. Um modelo de programação inteira ou mista para operação de um reservatório de abastecimento de água durante períodos críticos tem sido apresentado na literatura que inclui estes indicadores de desempenho. Os autores

citados acima apresentaram uma discussão sobre uma formulação melhorada deste modelo que representa resiliência mais completamente. Têm sido propostas diversas normas de valores mínimos de confiabilidade de um sistema de acordo com o tipo de utilização da água. VAZ¹¹ apud MAUAD (2000) refere-se a valores de confiabilidade de 90-97% para o abastecimento doméstico urbano, 80-90% para o abastecimento doméstico rural, 90-97% para o abastecimento industrial, 75-95% para a energia e 75-85% para irrigação.

O objetivo básico de modelos computacionais em análise de sistemas de recursos hídricos é simular o comportamento de sistemas físicos. Há uma gama de modelos no mercado, WURBS¹² apud GRIGG (1996) descreve as diferentes espécies de modelos hidrológicos e inclui as seguintes categorias: programa de objetivo geral; previsão de demanda e equilíbrio entre fornecimento e demanda; modelos de sistema de distribuição de água; modelos hidráulicos de rio, modelos de qualidade hídrica de reservatório e de rio; e modelos de sistema rio/reservatório.

Para planejamento de bacia hidrográfica, existem modelos atuais, principalmente os hidrológicos, que estão disponíveis. Os modelos hidrológicos podem simular os efeitos de sistemas de processos hidrológicos tais como infiltração, escoamento, fluxo de água subterrânea, interceptação, evapotranspiração e armazenamento, e eles computam balanços de massa completos (TUCCI, 1987).

Segundo TUCCI (1987), os modelos hidráulicos tratam do movimento de água em canais abertos ou redes de tubulações. Modelos de canal aberto, tais como o HEC-2, têm se mostrados úteis por anos para estudos confiáveis de cheia. Além disso, nessa categoria de modelos hidráulicos estão aqueles que simulam fluxos em sistemas de distribuição de água. Esses são essencialmente usados para gerenciar pressões em redes de distribuição urbana.

¹¹ VAZ, C. (1984). *Modelos de Planejamento de Sistemas de Albufeiras em Condições de Incerteza*. Tese (Doutorado) – IST, Lisboa.

¹² WURBS, Ralph A. (1994) Computer Models for Water Resources Planning and Management. U. S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Jul. Vozes apud GRIGG, Neil S. (1996). *Water Resources Management: principles, regulations, and cases*. McGraw-Hill. p. 128.

Alguns programas envolvem tanto aspectos hidrológicos quanto hidráulicos, exemplos de programas com tal característica são os usados na previsão de cheias. O HEC também tem desenvolvido modelos dessa natureza, tais como, o modelo HEC-1, usado na previsão de cheia e, um pacote sofisticado para a simulação de operação de reservatório, o HEC-5 (TUCCI, 1987).

Um exemplo de um modelo hidrológico de água subterrânea-superficial é o SAMSON (Stream-Aquifer Simulation Model), que foi desenvolvido por Hubert Morel-Seytoux (Colorado Water Resources Research Institute, 1985) para simular a interação de água superficial e água subterrânea. Pacotes de modelo integrado incluem o Stormwater Management Model (SWMM) que foi iniciado por volta de 1970. O modelo simula o escoamento para entradas, o transporte em bueiros, armazenamento em sistema e a qualidade da água em águas receptoras (TUCCI, 1987).

O modelo de simulação MIKE BASIN 2000, desenvolvido pelo *Danish Hydraulic Institute* – DHI da Dinamarca, está sendo considerado como uma nova e versátil ferramenta de suporte a decisões no planejamento de recursos hídricos cujas potencialidades tornam-no executável para análises hidrológicas extensas desde sistemas independentes de abastecimento de água para consumo urbano, irrigação, produção de energia até sistemas de usos múltiplos. DYRBAK (2000) realizou um estudo da operação de reservatórios na Polônia, utilizando o modelo MIKE BASIN 2000. O MIKE BASIN também foi utilizado no planejamento das bacias de “Great Ruaha” e “Pangani”, na Tanzânia, África, em 1996, com o objetivo de analisar as quantidades disponíveis nas bacias, os impactos e a importância dos usos da água para irrigação, geração de energia, abastecimento urbano e outros usos.

BENNETT et al. (1994) descreveram a aplicação do modelo interativo de sistema rio – aquífero (IRAS) à bacia hidrográfica Raritan, em New Jersey. As maiores questões na bacia Raritan são: (1) o uso integrado de água superficial e subterrânea, (2) disposição de fluxos mínimos legais ao longo do rio Raritan e, (3) projeto de instalações e políticas

operacionais necessárias para fornecimento seguro de demandas futuras. A aplicação do modelo IRAS para a bacia Raritan foi genérica e tem demonstrado o valor de ferramentas de simulação conceitualmente simples, mas flexível e de interface amigável.

Uma versão atualizada do modelo MODSIM chamado de MODSIMP32, que tem uma interface amigável desenvolvida na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP e é de domínio público, foi utilizado por AZAMBUJA (2000), em um estudo para determinar a disponibilidade hídrica da bacia do rio Piracicaba, relacionando as demandas de água atuais e futuras. O estudo mostrou que na bacia do rio Piracicaba, em períodos secos, não é possível atender a todas as demandas de água e ainda manter as vazões ecológicas no rio.

4.6. Modelos de Simulação/ Otimização

Segundo DANDY et al. (1997), a simulação é indubitavelmente a técnica mais comumente usada na avaliação do desempenho de sistemas de múltiplos reservatórios bem como em operações e planejamento. Embora se acredite que um modelo de simulação fornece a melhor estimativa do rendimento de um sistema de múltiplos reservatórios, contudo, isto não é necessariamente verdade, pois o rendimento do sistema dependerá das regras de operação adotadas. Vários são os modelos que utilizam não só a simulação como também a otimização, exemplos de modelos desse tipo são SIMYLD-II (Texas Water Development Board, 1972), MODSIM (Labadie et al., 1984), WATHNET (Kuczera, 1990), DWRSIM (Chung et al., 1989) e o modelo Acres (Sigvaldason, 1976).

Problemas de alocação de água podem envolver restrições econômicas, ambientais e hidrológicas complicadas e objetivas de gerenciamento conflitantes. As complicações são particularmente causadas pelos diferentes comportamentos de água subterrânea e superficial e a interação entre estes componentes e gerenciamento deles. BELAINEH et al. (1999) apresentaram um modelo de simulação/otimização (S/O) que integra regras de decisão linear de reservatório, simulações detalhadas de fluxos do sistema rio/aquífero, uso conjuntivo de

água superficial e subterrânea, e distribuição por canais de derivação para usuários de água. Tal modelo testou as hipóteses que melhoram a representação de interações escoamento superficial/aquífero dentro de um modelo S/O de um sistema de distribuição/ reservatório/ aquífero/ rio.

DANDY et al. (1997) compararam quatro diferentes métodos de avaliação do rendimento de um sistema de múltiplos reservatórios. Tais métodos são: (1) simulação, (2) um modelo de otimização-simulação combinado (WATHNET), (3) um modelo de otimização completo e (4) um modelo de otimização simplificado chamado de modelo “yield”. Esses métodos foram usados para estimar o desempenho histórico confiável do sistema de abastecimento de água de Canberra (Austrália). Segundo os autores, o modelo de otimização e o modelo “yield”, por considerarem conhecimento de afluências futuras, forneceram estimativas mais altas do rendimento do sistema, enquanto que o WATHNET apresentou uma compatibilização razoável na estimativa, usando regras de operação sugeridas que são realizáveis na prática.

5. BACIA HIDROGRÁFICA DO SAPUCAÍ/GRANDE

5.1. Estudos anteriores realizados na Bacia do Sapucaí/Grande

Segundo o Relatório Final do Aproveitamento Hidrelétrico do Rio Sapucaí¹³, desde o início do século XX, estudos vêm sendo desenvolvidos com vistas à implantação de aproveitamentos hidrelétricos ao longo do curso do rio Sapucaí. Tais estudos conduziram à construção de duas usinas, em operação, denominadas PCH Dourados e PCH São Joaquim, de propriedade da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL).

A partir da década de 50, diversos estudos foram realizados visando o aproveitamento global do potencial hidroenergético disponível no rio Sapucaí, destacando-se: Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – (1956); CANAMBRA – “Power Study of South Central Brazil” – (1963); Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores – CNEC – (1977) e Companhia Energética do Estado de São Paulo – CESP – (1987).

Neste último estudo, de um total de 10 aproveitamentos inventariados, 8 foram levados ao nível de estudos de viabilidade.

Em 1988, foi outorgada à CPFL a autorização para continuação dos estudos dos aproveitamentos do rio Sapucaí. Após análise dos estudos existentes, foi considerado pela CPFL, o trecho do rio compreendido entre as usinas de Palmeiras, Anhangüera e Retiro, como o mais viável para implantação de novos empreendimentos.

¹³ Aproveitamento Hidrelétrico do Rio Sapucaí: Relatório Final do Projeto Básico (2001). v.1 e 2. Desenvolvido pela Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL e ENGEVIX Engenharia S/C LTDA.

Para o aprofundamento dos estudos a CPFL contratou, em 1988, a empresa ENGERIO. Os estudos foram realizados em duas etapas. Inicialmente, foi elaborada uma análise crítica dos estudos de viabilidade, que concluiu pela viabilidade da construção das três usinas. A segunda etapa dos serviços consistiu na elaboração dos projetos básicos para os três aproveitamentos em questão.

Com a decisão da CPFL de retomada desses estudos, foi contratada, no final de 1999, a empresa ENGEVIX Engenharia S/C LTDA para a realização dos serviços em duas fases. Fase I – Análise Crítica dos Projetos Básicos e Fase II - Elaboração dos Projetos Básicos de Engenharia e Ambiental, a serem elaborados em função dos resultados obtidos na primeira fase.

5.2. Objetivos da construção das PCHs, Palmeiras, Anhangüera e Retiro

Segundo o Relatório Final do Projeto Básico (2001), o objetivo principal dos aproveitamentos é o de conectar novas usinas do rio Sapucaí ao sistema existente, não só gerando melhorias nos atuais níveis de suprimento energético da região, bem como aumentando a geração própria da CPFL.

Além disso, os aproveitamentos Palmeiras, Anhangüera e Retiro foram concebidos de forma a diversificar a utilização da água, estabelecendo outras finalidades além daquelas específicas para a geração de energia. Dentre elas, destacam-se: a criação de áreas de lazer, o aumento da produtividade pesqueira, abastecimento público e a irrigação de terras agrícolas marginais aos futuros reservatórios. Essas pequenas centrais elétricas foram planejadas de forma descentralizada, visando atender preferencialmente a demanda dos mercados locais de Guará, São Joaquim da Barra, Orlândia e Ituverava.

5.3. Caracterização geral da bacia do Sapucaí/Grande

5.3.1. Localização

As bacias hidrográficas do Estado de São Paulo pertencem à bacia do rio Paraná ou às bacias do Atlântico Sul-Leste e Atlântico Sudeste, segundo divisão hidrográfica adotada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pelo extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), hoje Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

O Estado de São Paulo compartilha bacias hidrográficas com os Estados de Minas Gerais e Paraná, no caso dos rios Grande e Paranapanema, está a montante do Estado do Rio de Janeiro, no caso da bacia do rio Paraíba do Sul, a jusante de Minas Gerais, no caso dos rios Sapucaí, Pardo, Mogi-Guaçu e Piracicaba, e a jusante do Paraná, no caso do rio Ribeira do Iguape.

De acordo com a Lei 9.034, de 27 de dezembro de 1994, o Estado de São Paulo passou a ser oficialmente dividido em 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI), que são: Mantiqueira, Paraíba do Sul, Litoral Norte, Pardo, Piracicaba/Capivari/Jundiaí, Alto Tietê, Baixada Santista, Sapucaí/Grande, Mogi-Guaçu, Tietê/Sorocaba, Ribeira do Iguape, Baixo Pardo/Grande, Tietê/Jacaré, Alto Paranapanema, Turvo Grande, Tietê/Batalha, Médio Paranapanema, São José dos Dourados, Baixo Tietê, Aguapeí, Peixe, Pontal do Paranapanema (ver Fig. 1).

FIGURA 1 - Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo.
(Fonte: <http://www.biotasp.org.br/biodiv/mapas/bacias>)

A bacia do Sapucaí/Grande abrange uma área de drenagem de 9.077 km². Apresenta como cursos d'água principais os rios Sapucaí, do Carmo, Grande, das Canoas, Ribeirão do Pinheirinho e Córrego do Esmeril e reservatórios: Estreito, Jaguará, Igarapava e Volta Grande.

O rio Sapucaí (ver Fig. 2) é formado pela confluência do córrego da Rocinha com os ribeirões Tomba Perna e Pinheirinho, próximo à divisa dos estados de São Paulo e Minas Gerais, rumando, na direção noroeste até a confluência com o rio Grande. Seus principais afluentes são o ribeirão Jardim, pela margem esquerda; e os ribeirões Sete Lagoas, da Estiva, Salgado, Santa Bárbara e Fortaleza, pela margem direita.

FIGURA 2 – Bacia do Sapucaí/Grande (Fonte: www.biotasp.org.br/biodiv/mapas/sgrande).

Os municípios integrantes da bacia são: Aramina, Batatais, Buritizal, Cristais Paulista, Franca, Guaíra, Guará, Igarapava, Ipuã, Itirapuã, Ituverava, Jeriquara, Miguelópolis, Nuporanga, Patrocínio Paulista, Pedregulho, Restinga, Ribeirão Corrente, Rifaina, Santo Antônio da Alegria, São Joaquim da Barra e São José da Bela Vista. Ainda estão parcialmente na área da bacia os municípios de Altinópolis e Orlândia, porém as respectivas sedes correspondem à UGRHI do Pardo.

A bacia do Sapucaí/Grande compreende 7 sub-bacias (Fig. 3), que são: Alto Sapucaí, Médio Sapucaí, Baixo Sapucaí, Ribeirão do Jardim/ Córrego do Lajeado, Rio do Carmo, Afluentes do Rio Grande e Rio Canoas.

FIGURA 3 – Sub-bacias da UGHRI do Sapucaí/Grande.

(Fonte: Relatório Zero – CBH/SMG)

As informações sobre morfologia, relevo, geologia e pedologia da bacia hidrográfica em estudo, apresentadas a seguir, foram obtidas junto à CPFL, através do Relatório Final do Aproveitamento da Bacia do Sapucaí/Grande. A coleta dessas informações foi realizada conjuntamente com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

5.3.2. *Morfologia e Relevo*

A paisagem dominante na região do empreendimento compõe-se de um amplo mosaico que alterna culturas de soja e cana-de-açúcar, atravessadas por estreitas matas ciliares.

As unidades de relevo do Estado de São Paulo, que compõem a paisagem da bacia hidrográfica do Rio Sapucaí, podem ser divididas, segundo os aspectos de relevo, altitude, orientação das formas topográficas e processos de sedimentação e erosão, em duas grandes províncias, as Cuestas Basálticas e o Planalto Ocidental.

As Cuestas Basálticas correspondem à província geomorfológica mais elevada (cerca de 500 a 1.190 metros de altitude). Ocupa em torno de 70% da área e abrange tanto a média como a alta porção da bacia do rio Sapucaí. A segunda província, mais rebaixada (cerca de 500 a 600 metros de altitude), corresponde ao Planalto Ocidental representado pela zona denominada pelo IPT de Áreas indivisas. Ocupa em torno de 30% da área restante, abrangendo especialmente a porção média inferior da bacia do Sapucaí. Estas duas grandes províncias refletem uma grande variedade de sistemas ou formas de relevo que, segundo o IPT, correspondem aos relevos de acumulações (àqueles desenvolvidos pela ação construtiva fluvial), relevos de degradação, em planaltos dissecados (compreendem relevo maduros produzidos pela atuação contínua dos processos de denudação, englobando relevos de colinas, morrotes, etc...), relevo residuais suportados por litologias particulares (engloba aqueles conjuntos de formas originadas por processos de degradação, porém com um caráter distintivo adicional dado pela natureza do substrato rochoso) e relevos de transição (constituem relevos interplanálticos caracterizados por uma alta energia e por uma atuação intensa dos processos de degradação).

As planícies aluviais, que correspondem aos relevos de acumulação, são representadas por terrenos baixos e mais ou menos planos, junto às margens dos rios, sujeitos periodicamente a inundações. Esta feição de relevo ocorre junto ao rio principal e seus

afluentas, com maior destaque ao longo dos rios Sapucaí, Santa Bárbara, Esmeril e dos ribeirões de nome Jardim e Sete Lagoas. De resto, os depósitos são de pequeno porte, ligados a trechos de alargamento dos vales, predominantemente constituídos por areia inconsolidadas de granulação variável.

Os relevos de degradação, em planaltos dissecados, correspondem a uma certa variedade de unidades de relevo denominadas pelo IPT de Colinas Amplas, Colinas Médias, Morros amplos, Morros Arredondados, Morrotes Alongados e Espigões.

Partilhando o extremo leste da bacia do rio Sapucaí no Estado de São Paulo, nas proximidades da divisa deste estado com Minas Gerais, encontram-se morros testemunhos isolados, representados pela unidade denominada de Mesas Basálticas, sustentada por litologia da Formação Serra Geral e Formação Botucatu, característicos dos relevos residuais. Suas altitudes variam de 1000 a 1160 metros. Segundo IPT, seus topos são aplainados a arredondados e suas vertentes mostram perfis retilíneos, muitas vezes com trechos escarpados tendo em alguns locais exposições de rochas.

As declividades predominantes estão em torno de 12% a 20%, podendo em alguns locais atingir até valores de 20% a 40%. A erosão laminar do tipo severa a muito severa desenvolve sulcos freqüentes de profundidade média.

A drenagem que se faz presente é de média densidade, percorrida por vales fechados. O padrão de drenagem fica entre o tipo pinado e subparalelo.

Os relevos de transição do tipo encostas não escarpadas, correspondem à unidade denominada pelo IPT de Encostas com Cânions Locais. Ela ocorre na porção média da bacia hidrográfica do Sapucaí/Grande, mais especificamente a oeste da cidade de São José da Bela Vista prolongando-se em direção ao Planalto de Franca. Suas altitudes atingem cerca de 800 a 900 metros. Estas encostas apresentam vertentes com perfis retilíneos a convexos e trechos escarpados.

5.3.3. *Geologia e Pedologia*

A bacia hidrográfica do rio Sapucaí situa-se geologicamente na borda nordeste da Bacia Intracratônica do Paraná que ocupa, no Brasil, segundo Estudos de Águas Subterrâneas, desenvolvidos pelo DAEE, em 1974, uma área de cerca de um milhão de km², estendendo-se ainda pelo Paraguai, Uruguai e Argentina. No território nacional abrange parte de Goiás, Minas Gerais e grandes áreas dos estados de Mato Grosso, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Esta bacia tem seu eixo dado pelo Rio Paraná, que a divide quase simetricamente.

As unidades litoestratigráficas representativas da bacia do rio Sapucaí, no Estado de São Paulo, correspondem aos depósitos Aluvionares Continentais Indiferenciados Holocênicos, depósitos Sedimentares Correlatos à Formação Itagueri suprabasálticos, cobrindo um intervalo de tempo que se estende, possivelmente, do Cretáceo Superior ao Holoceno, e a seqüência Vulcano-Sedimentar do Grupo São Bento da Bacia do Paraná, com importantes intrusões básicas tabulares, datadas do Mesozóico.

Dentro da referida bacia hidrográfica predominam rochas do Grupo São Bento, representadas pelas formações Pirambóia, Botucatu e Serra geral. A primeira delas é uma das unidades sedimentares de maior ocorrência no alto curso do Rio Sapucaí. É constituída por arenitos esbranquiçados, amarelados, avermelhados de grãos médios a muito finos, silticos-argilosos, polidos, subangulares e subarredondados, com intercalações de camadas de argilitos e siltitos. As estruturas presentes são representadas por estratificação cruzada, plana e acanalada, estratificações plano-paralelas nas porções siltico-argilosas são as estruturas sedimentares mais comuns.

As características litológicas e sedimentares desta unidade indicam origem continental fluvial com depósitos de rios meandrantos e pequenas lagoas associadas, em condições climáticas oxidantes.

Com uma distribuição bem menos generalizada, a segunda unidade, Formação Botucatu, encontra-se exposta na porção superior média da bacia do rio Sapucaí, numa faixa contínua às fraldas das serras basálticas e em suas escarpas. Esta unidade constitui-se quase inteiramente de arenitos de granulação fina e muito fina, com estratificação cruzada de grande a médio porte, muito friáveis ou silicificados, apresentando, na parte basal, corpos de arenitos conlomeráticos e conglomerados. O pacote sedimentar desta formação constitui uma unidade genérica depositada em ambiente desértico. A característica fundamental desta unidade é a monótona sucessão de corpos cunciformes de arenitos com seleção regular a boa, com teor de lama (silte e argila) em média inferior a 10%.

Os corpos de arenitos conlomeráticos, com estratificação cruzada de porte médio a pequeno, tem ocorrência local. Apresentam pouca matriz e seixos facetados. São depósitos torrenciais realizados por correntes temporárias. Mais rara é a ocorrência de depósitos lacustres, na parte superior da seção, constituídos de arenitos lamíticos e lamitos.

A terceira unidade corresponde à Formação Serra Geral, que apresenta distribuição generalizada a Norte e Sudeste da bacia hidrográfica do Sapucaí/Grande. Esta formação compreende a seqüência de derrames de lavas basálticas com intercalações de arenitos com as mesmas características dos pertencentes à Formação Botucatu.

A unidade consiste de lavas basálticas, toleíticas de textura afanítica, coloração cinza a negra, amigdaloidal no topo dos derrames, e com grande desenvolvimento de juntas verticais e horizontais. Intercalações de arenitos finos a médios, com estratificação cruzada tangencial, ocorrem principalmente na porção basal. Associam-se-lhes corpos intrusivos denominados pelo IPT, de intrusivas básica tabulares de mesma composição constituindo sobretudo diques e sills. Tais rochas intrusivas apresentam granulação mais grossa que as extrusivas basálticas, são holocristalinas e freqüentemente apresentam textura ofítica. Nas bordas, contudo, texturas e estruturas semelhantes à dos derrames são às vezes observados em diques e sills de pequena espessura. Os diques, verticais a subverticais, geralmente

preenchem fendas de tração, sendo paralelos às paredes, podendo também se associar a sills e cortarem os derrames.

A uniformidade dos derrames, a vasta extensão que cobrem, a associação a diques contemporâneos, a preservação local de morfologia das dunas e a raridade dos produtos piroclásticos indicam que os basaltos da Formação Serra Geral se originaram de extravasamento rápido de lava muito fluída através de geóclases e menores falhas. A persistência das condições desérticas durante o vulcanismo é comprovada pela existência de intercalações eólicas.

Ao Norte e ao Sul do médio curso do Sapucaí ocorrem, representando a seqüência sedimentar suprabasáltica, os depósitos Sedimentares Correlatos à Formação Itaqueri de estratigrafia, segundo IPT, ainda não completamente elucidada. São arenitos conglomeráticos siltitos e conglomerados oligomíticos com estruturas hidrodinâmicas, porém de composição predominantemente quartzítica e quartzosa, isolados em interflúvios situados na porção média da bacia do rio Sapucaí. As características dos sedimentos e das estruturas apontam ambiente fluvial muito enérgico, sujeito a bruscas mudanças de velocidade de transporte.

Do ponto de vista pedológico, conforme Carta de Solos do Estado de São Paulo, a área da bacia hidrográfica do rio Sapucaí, engloba, basicamente cinco unidades de solos, quais sejam: Litossolo Roxo, Latossolo Vermelho-Amarelo – Fase Arenosa, Litólico – Fase Substrato Basáltico, Regossolo e Hidromórficos.

A unidade Litossolo Roxo engloba solos muito profundos, argilosos, bem drenados e de coloração arroxeada. A pequena variação das características morfológicas faz com que os vários horizontes se apresentem pouco individualizados, com transições variando de graduais a difusas. Os solos desta unidade representam cerca de 76% da superfície da bacia do rio Sapucaí. Possuem, em geral, topografia que vai de suavemente ondulada a ondulada, com declives longos. Em certos pontos da bacia são encontrados em relevos mais acidentados.

A unidade Latossolo Vermelho Amarelo – Fase Arenosa é formada por solos profundos, de textura leve, bem drenados e de coloração vermelha amarelo. São solos ácidos de baixa fertilidade, individualizados, com transição variando de graduais a difusa. Os solos desta unidade representam cerca de 15% da superfície da bacia do referido rio no Estado de São Paulo. São solos localizados na região do Alto Planalto, onde formam manchas contínuas entrecostadas por solos de outras unidades.

A unidade correspondente ao solo Litológico – Fase Substrato Basáltica é caracterizada por apresentar solos pouco desenvolvidos, com espessura em torno de 35 centímetros construído pelo horizonte A e a camada D. São solos com saturação de bases alta. Os solos desta unidade representam cerca de 3% da superfície da bacia. Estes solos encontram-se ocupando os topos dos relevos residuais, distribuídos em pequenas manchas espessas localizadas no extremo leste da bacia do rio Sapucaí, divisa com o Estado de Minas Gerais. Esta unidade ocupa um relevo forte ondulado de topos angulosos, vertentes retilíneas a convexas e vales do tipo fechado. A altitude em que ocorrem estes solos gira em torno de 1000 metros.

A unidade Regossolo é enquadrada nos solos profundos, muito friável, de textura muito leve, acentuadamente drenado, com seqüência de horizontes A, C, originados de arenitos, normalmente ácidos e com fertilidade aparente muito baixa. Os solos desta unidade representam cerca de 5% da superfície da bacia do rio Sapucaí. Estes solos ocorrem em várias manchas descontínuas, umas grandes e outras pequenas, tendo como localização também o extremo leste da bacia. Ocupam as partes baixas do relevo nas depressões ou beiras dos rios ou ribeirões, ocorrendo também rodeando os relevos residuais ou afloramentos de arenito, onde se nota a influência direta do material de origem na formação destes solos. A altitude em que ocorrem gira em torno de 650 a 800 metros.

A unidade representada pelo solo do tipo Hidromórfico é constituída por solos de várzea, normalmente com relevo plano, pouco profundo, com características associadas com encharcamento redundando em acumulação de matéria orgânica na primeira camada ou

fenômeno de redução nas camadas subjacentes. Os solos desta unidade representam cerca de 1% da superfície da bacia do rio Sapucaí. Estes solos ocorrem em uma faixa estreita ao longo do referido rio, mais especialmente nas proximidades do encontro das águas dos rios Sapucaí e Grande. A altitude em que ocorrem gira em torno de 500 m.

5.3.4. *Clima*

Segundo o Relatório Final do Projeto Básico (2001), desenvolvido pela CPFL e ENGEVIX, a bacia do rio Sapucaí apresenta climas do tipo *Aw* para a parte mais baixa e *Cwa* para a parte mais alta, com pontos isolados do tipo *Cwb*, conforme descritos a seguir:

- *Aw*: clima tropical quente e úmido, com estação seca de outono-inverno, cerca de 80 a 90% de chuvas no período de outubro a março, temperatura média variando de 24,7°C a 21,4°C e amplitude térmica superior a 5°C.
- *Cwa*: clima mesotérmico, com verões quentes e inverno seco, atingindo regiões com altitudes entre 300,00 e 700,00 m, temperatura média anual variando de 21,8°C a 19,5°C.
- *Cwb*: clima mesotérmico com verões brandos e estação chuvosa no verão, abrangendo a região das serras, com temperatura média anual variando de 19,8°C a 17,4°C.

A bacia recebe influência das perturbações extratropicais e dos sistemas tropicais. As perturbações extratropicais que atingem a região são representadas, principalmente, pelas incursões de massas de ar frio, provenientes do sul do continente americano. As perturbações tropicais são representadas pelos sistemas convectivos oriundos dos contrastes térmicos sobre o continente.

Índices Climáticos

Os índices climáticos descritos a seguir, referem-se à estação meteorológica de Franca, conforme apresentados nas Normais Climatológicas (1961-1990), publicada pelo Departamento Nacional de Meteorologia.

Precipitação

A distribuição anual da precipitação média na bacia do rio Sapucaí pode ser caracterizada conforme os valores apresentados na tabela a seguir.

TABELA 2 – Precipitação Média Mensal (em mm)

Meses	Precipitação Média
Janeiro	297
Fevereiro	228
Março	180
Abril	80
Maio	57
Junho	27
Julho	22
Agosto	23
Setembro	72
Outubro	161
Novembro	201
Dezembro	276
Anual (mm/ano)	1.623

Fonte: Projeto Básico – CPFL.

A distribuição sazonal das chuvas mostra uma nítida caracterização entre o período chuvoso (outubro a março) e o período seco (abril a setembro). O período chuvoso contribui com mais de 80% do total anual. O trimestre mais chuvoso é dezembro, janeiro e fevereiro,

com índice superior a 200 mm, e o menos chuvoso está compreendido entre os meses de junho e agosto.

As precipitações máximas em 24 horas são da ordem de 127 mm e ocorrem com maior frequência no mês de dezembro.

Temperatura

As Normais Climatológicas permitem estimar as temperaturas médias mensais para a bacia do rio Sapucaí mostradas na tabela 3.

TABELA 3 – Temperaturas Médias Mensais, em °C

Meses	Temperatura Média Mensal
Janeiro	19,0
Fevereiro	18,3
Março	18,5
Abril	17,5
Maio	16,6
Junho	15,4
Julho	15,3
Agosto	17,8
Setembro	18,9
Outubro	19,7
Novembro	18,8
Dezembro	18,7
Anual (°C)	17,9

Fonte: Projeto Básico – CPFL.

A temperatura média anual é da ordem de 18°C, sendo o trimestre mais frio maio-junho-julho.

Umidade Relativa do Ar

A distribuição anual da umidade relativa na área da bacia do Sapucaí pode ser caracterizada na tabela a seguir.

TABELA 4 – Umidade Relativa (%)

Meses	Umidade Relativa
Janeiro	81
Fevereiro	75
Março	73
Abril	70
Maio	69
Junho	66
Julho	61
Agosto	55
Setembro	59
Outubro	67
Novembro	73
Dezembro	79
ANUAL	69

Fonte: Projeto Básico – CPFL.

Observa-se que os níveis de umidade na bacia são normais, com índices variando de 55 a 81%.

5.3.5. Hidrografia da bacia

Os dados apresentados a seguir foram obtidos junto à CPFL, através do Relatório Final do Aproveitamento Hidrelétrico do Rio Sapucaí (2001).

A bacia do rio Sapucaí drena uma área total de 650 km² e o comprimento total do rio Sapucaí foz-nascente é de 337 km.

Desde a sua nascente, o rio Sapucaí atravessa os municípios de Altinópolis, Patrocínio Paulista, Franca, Batatais, Nuporanga, São Joaquim da Barra, Guará e Ituverava, desembocando no rio Grande entre os municípios de Guaíra e Miguelópolis.

Os principais afluentes são o ribeirão do Jardim pela margem esquerda e os ribeirões Sete Lagoas, do Estiva, Salgados, Santa Bárbara e Fortaleza pela margem direita.

A bacia hidrográfica do Sapucaí/Grande apresenta uma forma estreita e longa, com fator de forma $k_f = 0,058$. Este coeficiente, utilizado como parâmetro para avaliar o alongamento da bacia, é um dos índices que permite indiretamente avaliar o potencial de ocorrência de cheias na bacia.

A densidade de drenagem da bacia, que mede a eficiência do sistema de drenagem da mesma, é considerada boa, e varia com o inverso da extensão do escoamento superficial, que para a bacia do rio Sapucaí vale $d_s = 4,87$.

A sinuosidade do rio Sapucaí tem coeficiente $\sin = 1,77$, indicando tendência a escoamentos não muito velozes. A declividade média equivalente do rio Sapucaí é $S_o = 0,097\%$.

5.3.6. Escoamento

a) Disponibilidade Hídrica Superficial

A vazão média específica de longo período para a bacia do rio Sapucaí foi avaliada em $16,4 \text{ l/s.km}^2$, de acordo com estudos de disponibilidade hídrica desenvolvidos pelo DAEE (1984). A média das vazões mínimas mensais situa-se em $6,8 \text{ l/s.km}^2$, enquanto que a vazão mínima mensal para 10 anos de período de retorno é de $3,3 \text{ l/s.km}^2$.

Na tabela 5, são mostradas a demanda e a disponibilidade superficial da bacia em estudo.

TABELA 5 – Demanda /Disponibilidade Hídrica Superficial

Demanda total (m ³ /s)		Disponibilidade (m ³ /s) ⁽¹⁾		(Dem.total/Q _{ref})x100 ⁽²⁾ (%)	
1990	2010	Q _{7,10}	Q _{ref}	1990	2010
10,9	19,5	28,0	35,0	31,1	55,7

Fonte: (1) DAEE; (2) Cálculo da equipe técnica. Q_{ref} = Vazão de referência. Dem. = Demanda.

Q_{7,10} é a vazão mínima de 7 dias consecutivos para 10 anos de período de retorno.

b) Disponibilidade Hídrica Subterrânea

O Aquífero Bauru, devido à sua espessura e ocorrência contínua em quase metade do Estado de São Paulo, é o mais externamente explorado, 9% da ocorrência desse aquífero no Estado está inserida na subzona hidrográfica da qual faz parte o rio Sapucaí.

Ainda na subzona do Sapucaí, encontram-se aflorando os aquíferos Cristalino (1,2%), Botucatu livre (15,3%), Botucatu confinado (80,6%), Diabásio (2,9%) e Basalto (68,4%).

Em maior detalhe, a área em estudo insere-se no Aquífero Basalto, que ocupa 1/3 do território Paulista, 32 mil km² do centro-leste de São Paulo, sendo recoberto, a oeste, pelos sedimentos Bauru-Caiuá.

Este aquífero é atualmente explorado por 1.300 poços tubulares, de profundidades entre 100 e 150 m e vazões variáveis de 10 a 100 m³/h – (DAEE, 1988). Suas águas são predominante bicarbonatadas cálcios (resíduo seco inferior a 200 mg/l), eventualmente com anomalias de altos teores de fluoretos e resíduos secos atingindo 800 mg/l.

O aquífero Basalto (Serra Geral) é, localmente, bastante vulnerável – fraturamento, disjunções colunares, horizontes vesiculares, zonas de tectonização – onde a velocidade de percolação pode atingir dezenas de centímetros por dia. Neste contexto, a exploração da água subterrânea e o manejo global dos recursos hídricos merecem mais atenção.

A disponibilidade hídrica subterrânea no aquífero Serra Geral é mostrada na tabela 6.

TABELA 6 – Disponibilidade Hídrica Subterrânea (m³/h)

Aquífero	Vazão potencial
Serra Geral	5 a 50

Fonte: PERH-1994/95

5.3.7. Características sócio-econômicas

Segundo o Comitê da Bacia Hidrográfica do Sapucaí/Grande (CBH/SMG), a bacia compreende municípios de pequeno e médio porte, à exceção do município de Franca que possui uma população superior a 250.000 habitantes, conforme tabela 7. As projeções de crescimento populacional indicam um aumento significativo para as próximas décadas. Segundo o SEADE, a população total da UGRHI em estudo é de aproximadamente 620.533 habitantes, sendo que o município de Franca representa mais de 48 % da população da bacia.

TABELA 7 – População total da UGRHI do Sapucaí/Grande

Municípios / Anos	1970*	1980	1991	1996	2000	2010
Aramina	5.046	3.437	4.057	4.220	4.336	4.620
Batatais	29.262	37.184	43.952	47.927	50.222	55.449
Buritizal	5.571	3.869	3.800	3.195	2.964	2.188
Cristais Paulista	4.974	4.904	5.626	6.297	6.749	7.904
Franca	93.638	147.962	231.334	266.617	295.722	368.338
Guairá	26.883	25.589	30.887	33.078	34.855	38.871
Guará	12.765	13.273	16.320	18.182	19.741	23.629
Igarapava	21.202	20.224	22.211	25.700	28.505	36.602
Ipuã	9.977	9.113	10.327	10.983	11.446	12.459
Itirapuã	4.684	4.923	5.046	5.371	5.639	6.277
Ituverava	27.380	27.414	32.948	34.097	34.827	36.300
Jeriquara	1.709	2.558	3.238	3.245	3.240	3.173
Miguelópolis	18.396	13.485	17.352	18.643	19.487	21.151

Municípios / Anos	1970*	1980	1991	1996	2000	2010
Nuporanga	5.683	5.047	5.776	6.113	6.371	6.997
Patrocínio Paulista	8.635	9.014	9.702	10.472	11.054	12.282
Pedregulho	14.780	12.899	13.724	14.775	15.412	16.768
Restinga	5.693	3.517	4.391	4.900	5.224	6.032
Ribeirão Corrente	2.194	2.730	3.218	3.517	3.736	4.256
Rifaina	6.180	3.347	2.902	3.244	3.606	4.702
Santo Antônio da Alegria	4.462	5.273	5.069	5.447	5.718	6.336
São Joaquim da Barra	24.359	29.201	35.829	40.016	43.359	51.630
São José da Bela Vista	6.781	6.634	7.119	7.752	8.320	9.672
TOTAL DA UGRHI	340.254	391.597	514.828	573.791	620.533	735.636
% – UGRHI/SP	1,91	1,57	1,64	1,68	1,71	1,78

Fonte: SEADE. * Fonte: IBGE

A população rural é pouco expressiva, totalizando 40.575 habitantes, ou seja, 6,54 % da população total.

5.3.8. Indústria

As indústrias presentes na região da bacia em estudo diversificam em 9 ramos de atividades (tabela 8), havendo predomínio de indústrias de curtume, correspondendo a 44% do total de indústrias inventariadas.

TABELA 8 – Distribuição das indústrias por ramo de atividades

Atividade	Número	Porcentagem
Abatedouro	2	4
Beneficiamento de leite	8	15
Cooperativa agrícola	1	2
Curtume	24	44
Fábrica de açúcar e álcool	9	17
Fábrica de produtos químicos	2	4

Atividade	Número	Porcentagem
Metalurgia	1	2
Não discriminado	1	2
Produtos alimentares/abatedouro e frigorífico	4	8
Saneamento	1	2
Total	53	100

Fonte: Relatório Zero do CBH/SMG.

5.3.9. Agricultura

Nesta bacia, o uso do solo predominante é o agrícola ocupando 52,1% do total de áreas na bacia, com destaque para o café, a soja, o milho e a cana, seguem as pastagens com 34,1%.

As atividades agrícolas são extensivas na porção noroeste. Municípios como Guaíra, Ipuã e Miguelópolis têm suas atividades econômicas sustentadas pela agricultura, principalmente de grãos, sendo comum a presença de equipamentos de irrigação do tipo pivô central. Os municípios de São Joaquim da Barra e Igarapava apresentam o cultivo da cana-de-açúcar como uma importante atividade agrícola. O café torna-se mais freqüente na região compreendida entre os municípios de Franca e Pedregulho.

A ocupação do solo da região é dominada pela cultura canavieira, evidenciando-se alguns sérios problemas de erosão em diversas áreas. Este modelo de ocupação, compartilhado pelo aproveitamento para o plantio de soja e milho, teve como consequência a redução drástica da cobertura florestal original ao longo dos anos.

Os efeitos diretos das atividades agrícolas e do desenvolvimento são evidenciados pelo intenso processo de carreamento das partículas de solo e o consequente assoreamento dos córregos e rios (e, possivelmente, do futuro reservatório), diminuindo sua capacidade de armazenamento de água.

5.3.10. Aproveitamentos hidrelétricos

A organização das informações relativas ao potencial hidrelétrico brasileiro é realizada pela Divisão de Recursos Hídricos e Inventário (DENI), integrante do Departamento de Estudos Energéticos, da Diretoria de Engenharia, ELETROBRÁS. Através do Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico (SIPOT), os dados são organizados e computados.

Os aproveitamentos hidrelétricos podem encontrar-se em sete estágios, são eles:

- Remanescente: resultado de estimativa realizada em escritório, a partir de dados existentes, sem qualquer levantamento complementar, considerando um trecho do curso d'água, via de regra, situado na cabeceira, sem determinar o local de implantação do aproveitamento;
- Individualizado: resultado de estimativa realizada em escritório para determinado local, a partir de dados existentes ou levantamentos expeditos, sem qualquer levantamento detalhado;
- Inventário: resultado de estudo da bacia hidrográfica, realizado para a determinação do seu potencial hidrelétrico através da escolha da melhor alternativa de divisão de queda, caracterizada pelo conjunto de aproveitamentos compatíveis entre si e com projetos desenvolvidos de forma a obter uma avaliação da energia disponível, dos impactos ambientais e dos custos de implantação dos empreendimentos;
- Viabilidade: resultado da concepção global do aproveitamento, considerando sua otimização técnico-econômica, compreendendo o dimensionamento das estruturas principais e das obras de infra-estrutura local, a definição da respectiva área de influência, do uso múltiplo da água e dos efeitos sobre o meio ambiente;
- Projeto Básico: aproveitamento detalhado, com orçamento definido, em profundidade que permita a elaboração dos documentos de licitação das obras civis e do fornecimento dos equipamentos eletromecânicos;

- Construção: aproveitamento que teve suas obras iniciadas, sem nenhuma unidade geradora em operação;
- Operação: aproveitamento que dispõe de pelo menos uma unidade geradora em operação.

Os aproveitamentos, para serem considerados nos estágios “inventário”, “viabilidade” ou “projeto básico”, devem ser aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Na tabela 9, são mostrados, segundo dados do SIPOT, todos os aproveitamentos hidrelétricos pertencentes à bacia hidrográfica do Sapucaí/Grande.

TABELA 9 – Aproveitamentos hidrelétricos na UGRHI 08

Nome	Entidade Operadora	Rio	Estágio	Potencia (MW)
Estreito	FURNAS	Rio Grande	Operação	1104
Jaguará	CEMIG	Rio Grande	Operação	424
Igarapava	CEMIG	Rio Grande	Operação	210
Volta Grande	CEMIG	Rio Grande	Operação	380
Buritis	CPFL	Rib. Bandeira	Operação	1,0
Esmeril	CPFL	Córr. Do Esmeril	Operação	2,1
Dourados	CPFL	R. Sapucaí-Mirim	Operação	10,75
São Joaquim	CPFL	R. Sapucaí-Mirim	Operação	8,0
Monjolinho	CPFL	R. Sapucaí-Mirim	Operação	21,7
Jaguará (ampl.)	CEMIG	Rio Grande	Projeto Bás.	216
Dourados (ampl.)	CPFL	R. Sapucaí-Mirim	Projeto Bás.	4,0
Palmeiras	CPFL	R. Sapucaí-Mirim	Projeto Bás.	13,6
Anhanguera	CPFL	R. Sapucaí-Mirim	Projeto Bás.	18,5
Retiro	CPFL	R. Sapucaí-Mirim	Projeto Bás.	14,4
Sapucaí	CPFL	R. Sapucaí-Mirim	Viabilidade	15,2
Santa Rita	CPFL	R. Sapucaí-Mirim	Viabilidade	16,5
São Sebastião	CPFL	R. Sapucaí-Mirim	Viabilidade	19,0
São Domingos	CPFL	R. Sapucaí-Mirim	Viabilidade	13,9
Canoa	CPFL	R. Sapucaí-Mirim	Invent. Final	4,0

Nome	Entidade Operadora	Rio	Estágio	Potência (MW)
Santa Bárbara	CPFL	R. Sapucaí-Mirim	Invent. Final	13,5

Fonte: SIPOT.

5.3.11. Fontes de poluição

Os padrões de qualidade da água doce são dados pela Resolução 20 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que, segundo seu uso preponderante, classifica os corpos hídricos em 9 classes. A resolução 20 do CONAMA estabelece ainda em seu artigo 21, padrões de emissão para fontes poluidoras. Desta forma, o controle da poluição hídrica pode ser feito através de padrões de qualidade do corpo receptor e limitações às fontes poluentes.

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), órgão responsável pelo diagnóstico de qualidade das águas, tem adotado um índice de qualidade das águas (IQA) que incorpora como parâmetros de análise: OD (oxigênio dissolvido), DBO (demanda bioquímica de oxigênio), coliformes fecais, temperatura da água, pH, nitrogênio total, fósforo total, sólidos totais e turbidez.

Para efeito de análise, a CETESB dividiu o estado em 29 bacias hidrográficas, constituindo o Sapucaí e o Ribeirão dos Bagres uma delas.

A qualidade da água é acompanhada por dois pontos de amostragem:

- Ribeirão dos Bagres sob a ponte na Rodovia Municipal que liga SP-334 a Restinga;
- Rio Sapucaí sob a ponte na Rodovia Franca - Barretos.

O rio Sapucaí é classificado pela Res. 20 da CONAMA como classe 2, ou seja é um corpo cujas águas destinam-se, preferencialmente:

- ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional;

- à proteção das comunidades aquáticas;
- à recreação de contato primário (esqui-aquático, natação e mergulho);
- à irrigação de hortaliças e plantas frutíferas;
- à criação natural e/ou intensiva (agricultura) de espécies destinadas à alimentação humana.

Cargas poluidoras

Ao longo dos rios e córregos que formam a bacia do Sapucaí/Grande são despejados diversos tipos de cargas poluidoras, destacando-se as de origem doméstica e industrial.

As cargas poluidoras de origem doméstica referem-se aos pontos de lançamento de esgotos que são considerados como fontes pontuais de poluição. Esses pontos de lançamento de esgoto afetam não só os cursos d' água, como também podem afetar as águas subterrâneas e solos de forma indireta.

Os esgotos domésticos caracterizam-se pela grande quantidade de matéria orgânica biodegradável, responsável por significativa depleção do oxigênio nos cursos d'água, como resultado da estabilização pelas bactérias. Estes efluentes apresentam ainda nutrientes e organismos patogênicos que podem causar efeitos deletérios no corpo receptor, dificultando, ou mesmo, inviabilizando o seu uso para um outro fim.

Foram identificados 57 pontos de lançamento de efluentes domésticos de uso público, resultando em carga orgânica total de 29.715 kg DBO₅ /dia. Verifica-se que 31 pontos de lançamento possuem tratamento prévio, correspondendo a 54% do total. Em termos de cargas orgânicas potenciais, 57% do total coletado na UGRHI passa por algum tipo de tratamento.

As cargas poluidoras de origem industrial correspondem aos lançamentos de efluentes líquidos diretamente nos rios e córregos, com ou sem tratamento prévio. A enorme diversidade de indústrias existentes na bacia faz com que haja uma maior variabilidade dos

contaminantes lançados aos corpos d'água, incluindo metais pesados, compostos orgânicos tóxicos e muitos outros que dependem das matérias-primas e dos processos industriais utilizados.

Outras fontes importantes de poluição são os aterros, lixões e outros tipos de disposição de resíduos sólidos domésticos ou industriais, bem como a prática da mineração.

6. METODOLOGIA

6.1. Modelo de simulação computacional IRAS

6.1.1. Características do modelo

O modelo de simulação utilizado neste estudo como ferramenta para o planejamento e gerenciamento de um sistema hídrico, é o modelo IRAS – Interactive River-Aquifer Simulation que foi desenvolvido pela Resources Planning Associates, INC. e pela *University of Cornell, Ithaca, NY*, em 1994¹⁴.

O programa de simulação IRAS foi desenvolvido para ajudar na avaliação do desempenho de projetos alternativos e políticas operacionais de sistemas de recursos hídricos. Um flexível e poderoso conjunto de potencialidades tem sido incorporado ao IRAS para permitir aos usuários definirem e quantificarem confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade de um sistema hídrico. O programa pode calcular e indicar essas medidas estatísticas com respeito às funções, definidas pelo usuário, tais como: afluências, efluências, volumes de armazenamento, energia hidrelétrica, concentração da qualidade da água, irrigação, abastecimento urbano e industrial, e aquíferos, em qualquer lugar do sistema (TAYLOR, 1998).

¹⁴ A versão do modelo IRAS utilizada neste estudo trabalha no ambiente DOS, mas pesquisadores da University of Cornell estão trabalhando em uma nova versão do modelo IRAS com interface com o Windows/Microsoft.

O programa IRAS tem a capacidade de simular todos os usos citados anteriormente com variações no tempo e no espaço.

Cada sistema a ser simulado ou pode incluir múltiplos rios interligados e interagindo com múltiplos aquíferos em grandes regiões, ou ele pode incluir somente uma parte de um único rio de uma pequena bacia hidrográfica. Definidos os objetivos a atingir, o sistema deve ser representado esquematicamente através de uma rede de nós e arcos.

Os nós de uma rede podem representar junções de dois ou mais rios, reservatórios, lagos naturais, áreas de pântano, aquíferos, locais de recarga ou retirada de água subterrânea, postos de medição, postos de monitoramento de vazão ou da qualidade da água, locais de demanda, locais de descarga de águas residuárias, etc.

Os arcos unidirecionais podem representar rios naturais e canais, diques ou tubulações de derivação. Os arcos bidirecionais podem representar a transferência de água, em qualquer direção, em qualquer um dos dois nós. Todos arcos conectados a nós de aquíferos e/ou de área pantanosa são bidirecionais. Arcos de derivação representam aquedutos ou canais não naturais (construídos).

O programa apresenta uma interface gráfica através da qual são realizadas a entrada de dados, a operação do modelo e a leitura e análise dos resultados. Essa interface facilita a interação do usuário não só em entrar, editar e apresentar graficamente os dados, como também na operação do modelo, na produção e visualização de vários gráficos e nas análises estatísticas dos resultados da simulação.

O modelo pode ser utilizado na avaliação tanto do desempenho de qualquer configuração de um sistema específico, como do conjunto de políticas operacionais. No entanto, o programa não possui uma capacidade de otimização do sistema, ou seja, ele não é capaz de identificar as alternativas ou política operacional ótima.

O programa é capaz de simular sistemas de recursos hídricos para vários períodos de tempo do ano (no máximo 60). Cada período do ano é dividido em etapas de simulação. O

usuário deve definir o número de períodos do ano (dias, semanas, quinzenas, meses, etc.) e o número, no mínimo de 12, de etapas de simulação. O intervalo de cálculo utilizado pelo modelo é definido pelo usuário, podendo este realizar simulações com diferentes intervalos de cálculo, desde que possua os dados de afluência e consumos discriminados nos intervalos de tempo pretendidos. Toda afluência e efluência, taxas de perda por infiltração e por evaporação, taxas de consumo e dados de entrada de águas residuárias são considerados constantes dentro de cada período do ano. No entanto, em cada etapa de tempo de simulação, os fluxos, consumos, derivações, volumes de armazenamento, perdas, energia produzida ou consumida e qualidade da água podem variar, dependendo de mudanças da condição do sistema e de suas políticas de operação.

O modelo e a operação de dados do sistema, que são armazenados em arquivos do tipo .SDB, podem ser acessados e modificados através da interface gráfica. Os dados de fluxos do rio e de carga residuária são armazenados, respectivamente, em arquivos do tipo .FLW e .WLF.

As unidades de entrada e de saída de todas as variáveis de fluxo, de volume de armazenamento e geração de energia elétrica são inteiramente definidas pelo usuário. Dados de entrada e de saída da qualidade da água são expressos em unidades de concentração (por exemplo, mg/l ou ppm). Todos os dados de saída de fluxo serão expressos nas unidades de fluxos usadas no arquivo de fluxo externo (arquivo .FLW). As unidades de todos os dados de entrada e de saída do volume de armazenamento também são definidas pelo usuário e, não precisam ser obrigatoriamente as mesmas usadas para os fluxos. O programa IRAS permite ao usuário obter as unidades desejadas através de constantes de conversão de unidades de fluxo e de armazenamento. A constante de conversão de fluxo deve converter as unidades de fluxo do arquivo .FLW para as unidades de simulação desejadas. A constante de conversão de armazenamento converte as unidades de fluxo de simulação desejadas para as unidades

desejadas de volume de armazenamento por dia. Ambas as constantes são incluídas no arquivo de fluxo .FLW.

O modelo se baseia em balanços de massa de quantidade de água e de cargas poluentes, levando em consideração fenômenos como a evaporação, a infiltração, o crescimento ou decrescimento de cargas poluentes por transformações químicas e/ou biológicas (CARMO, 1997). Em cada nó e em cada etapa de tempo de simulação, são realizados balanços de massa.

As perdas, em cada etapa de simulação tt , estão baseadas nos volumes de armazenamento, $S(n, tt)$, em cada nó n . Elas são calculadas a partir das funções (cota x área) e (cota x volume) e taxas de evaporação diária introduzidas pelo usuário. As perdas por evaporação ou por infiltração podem ser descritas pelas equações (1) e (2), respectivamente.

$$\begin{aligned} \text{Perda por evaporação} &= EL(n, tt) \\ &= \{ \text{área superficial associada ao } S(n, tt) \times \\ &\quad \text{taxa de evaporação diária durante o período do ano} \} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Perda por infiltração} &= SL(n, tt) = \\ &\quad \{ \text{perda diária em função da perda por infiltração para } S(n, tt) \} \end{aligned} \quad (2)$$

Após o cálculo das perdas, os volumes de armazenamento iniciais corrigidos são estimados. Os volumes de armazenamento iniciais $S(n, tt)$, sofrem redução por perdas, evaporação e infiltração, para cada nó de armazenamento. Os volumes de armazenamento $S(n, tt)$ são obtidos pela Eq. (3):

$$S(n, tt) = \max \{ 0.0, S(n, tt) - EL(n, tt) - SL(n, tt) \} \quad (3)$$

onde,

n : nó de armazenamento

tt : etapa de tempo da simulação

$S(n, tt)$: volume de armazenamento inicial corrigido

$S(n, tt)$: volume de armazenamento inicial

$EL(n, tt)$: perda por evaporação

$SL(n, tt)$: perda por infiltração

Após o cálculo dos volumes de armazenamento iniciais, são calculadas as efluências em nós. As efluências, $QO(n, tt)$, de nós n são iguais à diferença entre as afluências deles, $QI(n, tt)$, e qualquer retirada de água, $C(n, tt)$. As efluências podem ser descritas pela Eq. (4).

$$QO(n, tt) = QI(n, tt) - C(n, tt) \quad (4)$$

Uma vez determinada a efluência de um nó de armazenamento, o volume de armazenamento final (volume de armazenamento do final da etapa de tempo de simulação) pode ser calculado a partir de um balanço de massa. Este considera o armazenamento inicial, a afluência, as perdas, e a efluência, na etapa de tempo de simulação:

$$\begin{aligned} \text{Armazenamento Final} = S(n, tt + 1) = \\ S(n, tt) + QI(n, tt) - \text{Losses}(n, tt) - QO(n, tt) \end{aligned} \quad (5)$$

onde,

$QI(n, tt)$: afluência no nó;

$QO(n, tt)$: efluência no;

$\text{Losses}(n, tt)$: perdas

6.1.2. Dados de entrada

Os dados de entrada dependem do sistema a ser simulado e dos objetivos da simulação. Os elementos necessários para os estudos mais freqüentes, incluem dados fluviométricos, de consumos e dos reservatórios. Para cada reservatório é necessário definir a sua capacidade de volume de armazenamento ativo total e volume de armazenamento inicial, vazão ou liberação mínima, a curva de área inundada e a curva de volume armazenado em função da cota do nível da água, perda de volume por infiltração diária em função do volume armazenado, a regra de operação do reservatório em função do volume armazenado e a taxa de evaporação anual. Para cada ponto de consumo é necessário indicar os volumes de água a fornecer em cada intervalo de simulação, bem como as fontes de fornecimento de água e uma regra de prioridade de utilização dessas fontes. Para cada tomada de água, define-se uma função que estabeleça o escoamento a desviar em função do escoamento disponível. Para cada arco da rede, pode ser necessário definir o comprimento do trecho do sistema que o arco apresenta, a capacidade de escoamento do trecho em estudo, funções de perda de água por evaporação e por infiltração e parâmetros do modelo de propagação de ondas de cheia (OLIVEIRA, 1995).

6.1.3. Políticas operacionais no modelo IRAS

Políticas de operação de reservatórios especificam a liberação requerida do reservatório como uma função do volume de armazenamento inicial e da afluência, em cada período do ano definido (LOUCKS et al., 1981).

Existem vários tipos de regras de liberação de reservatórios. Algumas regras identificam metas de volumes de armazenamento (“rule curves”), enquanto outras

identificam zonas de armazenamento, sendo cada uma associada a uma política de liberação do volume.

No modelo, as duas opções estão disponíveis para a definição de políticas operacionais dos reservatórios.

Liberações de único reservatório independente

No programa IRAS, as regras de liberação de único reservatório independente são baseadas em um número de zonas de armazenamento definidas pelo usuário em cada período do ano (t). Para cada zona de armazenamento (z), que pode ser no máximo 7, devem ser definidos os volumes de armazenamento mínimos ($BS_{mn}(n, z, t)$ e $ES_{mn}(n, z, t)$) e máximos ($BS_{mx}(n, z, t)$ e $ES_{mx}(n, z, t)$) no início (B) e no final (E) do período do ano t na zona z . Liberações do reservatórios, $BR_{mn}(n, z, t)$, $ER_{mn}(n, z, t)$, ($BR_{mx}(n, z, t)$ e $ER_{mx}(n, z, t)$), devem estar associadas aos quatros volumes definidos em cada zona z , como mostrado na Fig. 4. Essas liberações têm como restrição o fato de não poderem ser negativas.

FIGURA 4 – Processo de interpolação utilizado no modelo IRAS.

A liberação do reservatório em qualquer etapa de tempo de simulação (tt) será calculada através de uma interpolação linear das quatro liberações definidas sobre o armazenamento, bem como o tempo dentro da zona de armazenamento e o período do ano. Essa liberação depende da zona de armazenamento aplicável no período do ano. Para identificar essa zona, os limites do volume de armazenamento, $S_{mn}(n, z, tt)$ e $S_{mx}(n, z, tt)$, de cada zona z no início da etapa de simulação tt no período do ano t da simulação, são determinados por interpolação. O processo de interpolação desenvolvido no IRAS está descrito no Anexo A.

Liberações de múltiplos reservatórios interdependentes

A regra de liberação de múltiplos reservatórios, operados interdependentemente como um grupo, é definida no modelo IRAS como uma função do armazenamento total do grupo de reservatórios. Se a regra de operação do grupo está localizada em um dos reservatórios, usualmente o reservatório mais à jusante, a liberação daquele reservatório será determinada pelo processo descrito para um único reservatório independente.

As liberações dos outros reservatórios do grupo serão determinadas pelas metas de armazenamento dos reservatórios definidas pelo usuário ou pelas funções de balanço. Essas funções de balanço, que devem ser definidas para cada período do ano t , indicam o armazenamento “meta” ou desejado em cada reservatório do grupo à montante como função do armazenamento total dos reservatórios. O modelo mantém a liberação de todos os reservatórios em balanço durante a simulação, em cada etapa de tempo de simulação. A partir da definição do volume de armazenamento total do grupo de reservatórios, no início da etapa de tempo tt , e da liberação total do grupo, o programa calcula o volume de armazenamento do grupo no final da etapa de tempo de simulação.

6.1.4. Dados limites utilizados no modelo

O modelo através do uso de valores limites iniciais identifica quando e onde as variáveis do sistema podem estar em estado ou em uma escala não satisfatória. Atribui-se a cada variável simulada dois valores limites iniciais. Esses dois valores dividem os valores possíveis da variável em três seções ou zonas. A cada uma destas zonas pode ser atribuída uma cor verde (satisfatório), amarelo (advertência) ou vermelho (insatisfatório). Existem seis combinações possíveis de atribuições da cor ou zona alternativa, como podem ser vistas na tabela 10.

TABELA 10 – Combinações alternativas de cor associadas às zonas de valores variáveis

Alternativa	1	2	3	4	5	6
Zona Elevada	Amarelo	Verde	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Amarelo
Zona Média	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde
Zona Baixa	Vermelho	Vermelho	Verde	Amarelo	Vermelho	Amarelo

O programa permite definir e modificar esses valores limites depois de ter sido executada uma simulação. Os dois valores limites iniciais associados a cada variável da simulação não afetam os resultados da simulação, entretanto, esses valores são empregados em muitas das características estatísticas e outras do indicador de desempenho.

As variáveis do volume de armazenamento do aquífero, do lago e do reservatório optam pela alternativa 1, admitindo-se que os volumes do armazenamento em uma escala média são melhores representados do que em caso extremos. Todas as variáveis de afluições e de efluências, incluindo consumo do reservatório, optam pela alternativa 2.

6.1.5. Impressões de séries de tempo e de espaço

O modelo IRAS apresenta inúmeras opções para indicar alguns ou todos os valores das variáveis simuladas que ocorrem sobre o tempo em qualquer nó ou arco ou sobre o espaço em qualquer tempo. Essas opções incluem ensaios da simulação da série de tempo, ensaios da simulação espacial das variáveis e as tabelas de dados. O programa permite a indicação de uma só vez de até quatro impressões de variáveis únicas ou múltiplas simuladas.

Da seqüência de simulações em um único gráfico, pode-se analisar a propagação e a probabilidade dos valores que uma variável pode assumir em um ponto particular no espaço e no tempo.

6.1.6. Indicadores dinâmicos

Definidos os valores limites iniciais das variáveis desejadas, pode-se escolher uma sucessão dinâmica dos indicadores, codificada em cores, que mostram escalas de valores das variáveis sobre o tempo. Cada indicador mostrará cada nó ou arco (ou sua representação geográfica) nas cores verde, amarela ou vermelha. Cada indicador está associado a uma seqüência de fluxo particular, ao ano e ao período do ano.

Uma vez que as variáveis múltiplas são simuladas em cada nó ou arco, alguma prioridade do indicador de cor tem de ser estabelecida. Se alguns dos valores das variáveis simuladas estão em uma zona vermelha em um nó ou arco, então esse nó ou arco, ou sua representação geográfica, será indicado em vermelho. O vermelho tem prioridade sobre o amarelo e o verde. Se nenhum valor da variável estiver em sua zona vermelha, o amarelo aparecerá, a menos que todas as variáveis simuladas, nesse nó ou arco, estiverem em uma escala satisfatória ou verde. O amarelo tem prioridade sobre o verde. Após a determinação

dos valores limites iniciais, que separam essas três escalas de valores para cada uma das variáveis, deve ser escolhida a alternativa da cor da zona entre as seis opções mostradas na Tabela 10. Os valores limites iniciais não atribuídos às variáveis são supostos sempre para estarem em sua escala verde.

6.1.7. Indicadores estatísticos

Para toda variável simulada que tenha os limites iniciais definidos, além dos indicadores dinâmicos, os indicadores estatísticos, que incluem medidas de confiabilidade e de resiliência, também podem ser indicados. Quando os valores limites iniciais não forem identificados para uma variável particular, as medidas de confiabilidade e de resiliência do desempenho não podem ser definidas para essa variável.

A confiabilidade de uma variável específica é a probabilidade de que seu valor esteja na zona satisfatória (verde) ou na zona de advertência (amarela). Daí há uma “confiabilidade verde” e uma “confiabilidade amarela”. Ambas são baseadas nos valores médios de cada um dos períodos intranuais simulados.

Essas confiabilidades são definidas como

$$\text{Confiabilidade verde} = 1.0 - \frac{n^{\circ} \text{ de valores simulados na zona amarela e vermelha}}{n^{\circ} \text{ de períodos intranuais simulados}} \quad (6)$$

$$\text{Confiabilidade amarela} = 1.0 - \frac{n^{\circ} \text{ de valores simulados na zona vermelha}}{n^{\circ} \text{ de períodos intranuais simulados}} \quad (7)$$

A confiabilidade verde freqüentemente será menor que a confiabilidade amarela. Se elas são iguais, isto significa que não há eventos “amarelo”, somente “verde” e possivelmente eventos “vermelho”, se a zona vermelha for junto à zona verde.

A resiliência é a medida de como rapidamente uma variável, tendo um valor em suas zonas amarela e vermelha, obterá um valor em etapas sucessivas de tempo da simulação que esteja em suas zonas verde ou amarela, respectivamente. Ou seja, é a probabilidade que na etapa seguinte de tempo da simulação seu valor entrará em uma zona mais satisfatória.

Assim como para a confiabilidade, a resiliência também apresenta dois tipos, a “resiliência vermelha” e a “resiliência amarela”, definidas como:

$$\text{Resiliência vermelha} = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de períodos int ranuais em que um valor na zona vermelha foi seguido por um valor na zona amarela ou na zona verde}}{\text{n}^{\circ} \text{ de valores simulados na zona vermelha}} \quad (8)$$

$$\text{Resiliência amarela} = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de períodos int ranuais em que um valor na zona amarela foi seguido por um valor na zona verde}}{\text{n}^{\circ} \text{ de valores simulados na zona amarela}} \quad (9)$$

Se não houver valores das variáveis simuladas na zona vermelha, então a confiabilidade será amarela e a resiliência vermelha não é definida. Se não houver nenhum valor na zona amarela, então a confiabilidade verde se igualará à confiabilidade amarela e a resiliência amarela não será definida.

6.1.8. Distribuições da probabilidade

O modelo de simulação IRAS indica as distribuições da probabilidade de indicadores de desempenho da resiliência e da vulnerabilidade. As distribuições da probabilidade da resiliência indicam as probabilidades de diferentes durações em uma zona vermelha ou amarela. A duração (número de períodos no ano) de uma seqüência de valores na zona vermelha começa quando a seqüência de valores está na zona vermelha após estar em uma zona amarela ou verde e termina quando a seqüência de valores sai da zona vermelha e entra

na zona amarela ou verde. Em casos onde a zona vermelha é adjacente à uma zona amarela, a duração de uma sequência de valores na zona amarela começa quando a sequência sai primeiro da zona verde e entra na zona vermelha ou amarela e termina quando essa sequência de valores na zona vermelha ou amarela entra na zona verde. Sequências de valores na zona amarela incluem todas as partes que estão dentro da zona vermelha (junto às zonas amarelas) antes de entrar na zona verde.

Distribuições da probabilidade de vulnerabilidade indicam as probabilidades de diferentes extensões (magnitudes) de valores insatisfatórios (zona vermelha ou amarela). Distribuições da probabilidade de vulnerabilidade amarela mostram as probabilidades das diferenças absolutas entre valores variáveis na zona amarela (e na zona vermelha adjacente, quando aplicável) e o valor limite inicial mais próximo que separam as zonas vermelha e amarela. Distribuições da probabilidade de vulnerabilidade vermelha mostra as probabilidades das diferenças entre os valores na zona vermelha e os valores dos limites mais próximos que separam a zona vermelha da zona verde ou amarela.

A resiliência e a vulnerabilidade podem ser indicadas como distribuições condicionais ou incondicionais (histogramas). Distribuições incondicionais consideram a média dos valores do período intranual, enquanto que distribuições condicionais trabalham somente com valores que estão em uma zona amarela ou em uma vermelha.

6.2. Descrição do sistema utilizado

Os cinco aproveitamentos hidrelétricos em operação ou projeto básico (tabela 11), localizados ao longo do Rio Sapucaí, foram escolhidos para este estudo. Considera-se dois cenários. O primeiro representa a situação atual, compreendendo apenas as usinas em operação, PCH Dourados e PCH São Joaquim. O segundo corresponde, além das usinas em

operação, a instalação das três usinas em projeto básico, as Pequenas Centrais Elétricas (PCHs) Palmeiras, Anhangüera e Retiro.

TABELA 11 – Aproveitamentos hidrelétricos no Rio Sapucaí

Nome	Rio	Estágio	Potência (MW)
Dourados	R. Sapucaí	Operação	10,75
São Joaquim	R. Sapucaí	Operação	8,0
Palmeiras	R. Sapucaí	Projeto Bás.	13,6
Anhangüera	R. Sapucaí	Projeto Bás.	18,5
Retiro	R. Sapucaí	Projeto Bás.	14,4

Fonte: Projeto Básico (CPFL).

Na Fig. 05, são apresentados os esquemas do sistema simulado. O primeiro (a) é composto de dois curso d'água, o Rio Sapucaí e o seu afluente, o Ribeirão do Buriti, e de duas usinas hidrelétricas, PCH Dourados e PCH de São Joaquim. São consideradas duas tomadas de água para abastecimento urbano e industrial, sendo a primeira realizada no reservatório de São Joaquim e, a outra, realizada no trecho do Rio Sapucaí (à jusante da PCH São Joaquim). Considera-se, também, uma tomada de água para irrigação, realizada no reservatório de São Joaquim.

O segundo esquema (Fig. 05 (b)), é formado pelo Rio Sapucaí e pelo Ribeirão do Buriti, pelas duas usinas em operação e pelas três PCHs, Palmeiras, Anhangüera e Retiro, em projeto básico. Para este cenário, consideram-se duas tomadas de água para abastecimento urbano e industrial, sendo a primeira realizada no reservatório de São Joaquim e, a outra, realizada no reservatório de Anhangüera. Além disso, uma tomada de água para irrigação, realizada no reservatório de São Joaquim, é considerada.

FIGURA 5 – Esquemas do sistema simulado.

Nas figuras 06 e 07, são apresentadas as configurações dos sistemas simulados através de uma rede de nós e arcos utilizada no modelo IRAS.

FIGURA 6 – Rede de nós e arcos do modelo IRAS utilizada no estudo (Cenário 1).

FIGURA 7 – Rede de nós e arcos do modelo IRAS utilizada no estudo (Cenário 2).

6.3. Levantamento de dados disponíveis

Os resultados apresentados por modelos matemáticos levam em consideração dados de entrada que devem representar, da melhor maneira possível, o comportamento de um sistema hídrico real. Portanto, quanto maior for o conhecimento do sistema a ser simulado, maior será a eficácia do modelo aplicado. Em virtude disso, a primeira fase dos estudos compreendeu um trabalho de pesquisa e análise de dados.

6.3.1. Localização e características dos reservatórios

A PCH Dourados localiza-se entre os municípios de São José da Bela Vista e Nuporanga, sendo seguida da PCH de São Joaquim. Os aproveitamentos Palmeiras, Anhangüera e Retiro (Fig. 8) estão situados no curso do rio Sapucaí, no trecho entre os municípios de São Joaquim da Barra e Guará.

FIGURA 8 – Localização dos aproveitamentos hidrelétricos em estudo.

Fonte: Projeto Básico (CPFL).

As características principais dos reservatórios, fornecidas pela CPFL, são apresentadas nas tabelas 12 e 13.

TABELA 12 – Dados principais das PCHs em operação

Dados	PCH Dourados	PCH São Joaquim
N.A. Montante (m)	587,34	582,65
N. A. Jusante (m)	557,26	554,80
Área do reservatório (km ²)	2,70	0,93
Volume acumulado total (hm ³)	0,035	2,00
Potência instalada (MW)	10,75	8,00

Fonte: Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL.

TABELA 13 – Dados principais das PCHs em projeto básico

Dados	PCH Palmeiras	PCH Anhangüera	PCH Retiro
N.A. Montante ⁽¹⁾ (m)	556,00	540,50	523,00
N. A. Jusante ⁽²⁾ (m)	542,73	523,10	509,82
Área do reservatório ⁽³⁾ (km ²)	2,67	2,00	3,13
Volume acumulado total (hm ³)	16,50	12,00	16,46
Queda nominal (m)	13,10	17,16	13,10
Energia firme (MW médio)	6,91	8,91	7,17
Energia média (MW médio)	8,13	10,60	8,53
Potência instalada (MW)	13,60	18,50	14,40

Fonte: Projeto Básico (CPFL)

(1) NA máximo normal de operação à montante. (2) NA máximo normal à jusante.

(3) Área do reservatório no NA máximo normal.

6.3.2. Afluências

Os dados de vazões utilizados foram as séries sintéticas de vazões mensais ao longo dos cursos d'água, Rio Sapucaí e Rib. do Buriti, compostas de 18 anos de dados observados (1982-1999), obtidas dos postos fluviométricos Fazenda Velha e Buriti, respectivamente.

TABELA 14 – Demandas cadastradas na UGRHI 08 (CBH/SMG)

Uso	Número de usuários	Vazões (m ³ /s)
Público	16	1,498
Industrial	7	0,170
Irrigação	14	0,026

Assim sendo, optou-se por outra fonte de informação dos dados de consumo de água. Outros dados foram obtidos junto ao Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) do Estado de São Paulo (2000-2003). Na tabela 15, são apresentadas as demandas de uso da água para a UGRHI contidas no PERH (2000-2003).

TABELA 15 – Demandas cadastradas na UGRHI 08 (PERH)

Uso	Vazões (m ³ /s)
Doméstico	1,27
Industrial	0,17
Irrigação	9,86
Total	11,30

Observou-se que, os dados de outorga do uso da água para irrigação são muito pequenos se comparados aos dados de demanda para irrigação contido no PERH (2000-2003). Em contato com o CBH/SMG, nos foi informado que a demanda de água para irrigação varia de 6 a 9 m³/s. Optou-se em utilizar os dados de demanda para o uso doméstico e industrial obtidos no Relatório Zero do CBH-SMG, enquanto que os dados de demanda para irrigação utilizados foram os obtidos junto ao PERH, uma vez que eles encontram-se mais representativos. Assim, os dados de demanda usados na simulação do sistema hídrico em estudo são apresentados na tabela 16.

TABELA 16 – Demandas de água utilizadas no modelo IRAS

Uso	Vazões (m ³ /s)
Doméstico	1,50
Industrial	0,17
Irrigação	9,86
Total	11,48

Consumo urbano e industrial

Segundo as estimativas do CBH/SMG, o consumo urbano e industrial, para o trecho do rio Sapucaí em estudo, é cerca de 12,93 milhões de m³ por ano. Considera-se que parte desse volume de água, cerca de 5,68 milhões de m³ por ano, é retirado diretamente do reservatório de São Joaquim e, a outra parte, aproximadamente 7,25 milhões de m³ por ano, é retirado diretamente do reservatório de Anhangüera (a ser construído). Esses consumos são distribuídos igualmente ao longo do ano. Nas figuras 10 e 11, são mostradas as alocações dos consumos urbano e industrial no modelo de simulação IRAS.

FIGURA 10 – Alocação do consumo urbano e industrial (1) no modelo IRAS.

TABELA 17 – Distribuição mensal dos consumos

Usos	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano (10 ⁶ m ³)
Urb. e Ind.(1)	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	5,7
Urb. e Ind.(2)	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	7,3
I1: Irrig.	-	-	-	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	-	-	-	94,6
I2: Irrig.	-	-	-	7,89	7,89	23,65	23,65	23,65	7,89	-	-	-	94,6
I3: Irrig.	-	-	-	-	-	31,54	31,54	31,54	-	-	-	-	94,6
Jusante ^(*)	18,40	18,40	18,40	18,40	18,40	18,40	18,40	18,40	18,40	18,40	18,40	18,40	220,8

As três hipóteses para o sistema em estudo:

Usos considerados na hipótese 1: Urb. e Ind.(1), Urb. e Ind.(2), Irrig.1 e Jusante.

Usos considerados na hipótese 2: Urb. e Ind.(1), Urb. e Ind.(2), Irrig.2 e Jusante.

Usos considerados na hipótese 3: Urb. e Ind.(1), Urb. e Ind.(2), Irrig.3 e Jusante.

^(*) Consumo à jusante descrito na pág. 72.

FIGURA 12 – Alocação do consumo de irrigação no modelo IRAS (hipótese 1).

FIGURA 13 – Alocação do consumo de irrigação no modelo IRAS (hipótese 2).

FIGURA 14 – Alocação do consumo de irrigação no modelo IRAS (hipótese 3).

Consumo de água à jusante

Esse consumo corresponde ao consumo de irrigação nos municípios Guaíra, Ipuã e Miguelópolis mais o consumo urbano das cidades localizadas à jusante das usinas, perfazendo um consumo anual de cerca de 220,8 milhões de m^3 , distribuídos igualmente ao longo do ano. Os dados de consumo à jusante são alocados no modelo IRAS conforme a Fig. 15.

$$\begin{aligned} \text{Energia (kWh)} = & 9,81 \times \text{Fluxo (m}^3/\text{s)} \times \text{Altura útil (m)} \times \eta \text{ (eficiência)} \\ & \times \text{número de horas na etapa de tempo} \end{aligned} \quad (12)$$

Usando a constante de conversão de armazenamento, que converte as unidades de fluxo em unidades do volume armazenado por dia, e então a multiplicando pelo número dos dias de cada etapa de tempo da simulação, define-se o fluxo em unidades de volume de armazenamento pela etapa de tempo de simulação.

Assim, se os fluxos forem expressos na unidade (m^3/s) e as unidades do volume de armazenamento estiverem em $1.000 \text{ (m}^3\text{)}$, o modelo converte as unidades de fluxo para 1.000 m^3 por etapa de tempo de simulação.

As unidades em (m^3/s) começam então a serem substituídas pelo fluxo em $1.000 \text{ (m}^3\text{)}$ pela etapa de tempo, dividindo-se pelo produto das horas da etapa de tempo e do número de segundos.

Então:

$$\begin{aligned} \text{Fluxo (m}^3/\text{s)} = & 1.000 \times (1.000 \text{ m}^3 \text{ pela etapa de tempo}) / \\ & (\text{horas da etapa de tempo} \times 3600 \text{ seg/h}) \end{aligned} \quad (13)$$

Combinando as equações (12) e (13), temos:

$$\begin{aligned} \text{Energia (kWh)} = & 9,81 \times \text{Fluxo (1000 m}^3 \text{ / etapa de tempo)} \\ & \text{Altura útil (m)} \times 1000 \times \eta \text{ (eficiência)} / (3600 \text{ seg / horas)} \end{aligned} \quad (14)$$

Simplificando:

$$\begin{aligned} \text{Energia (kWh)} = & 2.725 \times \text{Fluxo (1000 m}^3 \text{ / etapa de tempo)} \\ & \times \text{Altura útil (m)} \times \eta \end{aligned} \quad (15)$$

Na simulação do sistema em estudo, a unidade do volume armazenado está expresso em milhões de m^3 (hm^3). Usando a constante de conversão de (1/30), para converter as unidades de fluxo desejadas na simulação para as unidades de volume de armazenamento por dia, e a energia a ser produzida estando expressa em (MWh), significa que a constante de produção de energia é a mesma.

Para este estudo, foram utilizados os seguintes dados na produção de energia elétrica:

- Capacidade de cada usina em (MW);
- Constante de produção de energia: $2.725 \times (\text{eficiência})$, neste caso, $0,85 = 2.136$;
- Fator de capacidade (fração do tempo em que a energia pode ser produzida): 0,95 (Dourados e São Joaquim) e 1,0 (Palmeiras, Anhanguera e Retiro).

Na Fig. 16, são apresentados os dados de entrada para geração de energia elétrica do aproveitamento hidrelétrico de Palmeiras.

FIGURA 16 – Dados de entrada para geração de energia.

Consumo por evaporação

A tabela 18 apresenta os valores médios mensais de evaporação na bacia do rio Sapucaí.

Perdas de água por infiltração e da rede fluvial não foram consideradas, admitindo-se que esse erro cometido é compensado pelos acréscimos de aflúências por precipitação direta sobre os reservatórios.

TABELA 18 – Distribuição mensal da evaporação (mm)

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Anual
91	87	105	108	122	128	161	199	192	163	126	99	1581

Os dados de entrada considerados para a evaporação¹⁵ no modelo IRAS são mostrados na Fig. 17.

FIGURA 17 – Consumo por evaporação.

¹⁵ A taxa de evaporação do reservatório no modelo IRAS é dada pelo volume do reservatório/ área por dia. Para o reservatório de São Joaquim no mês de jan.:

Volume evaporado = $(0,93 \times 10^6 \text{ m}^2) \times (91 \times 10^{-3} \text{ m}) = 84.630 \text{ m}^3 = 0,08463 \text{ hm}^3$.

Taxa de evaporação = $0,08463 [\text{hm}^3] \times (0,93 [\text{km}^2] / 30 [\text{dias}]) = 0,0030$.

6.4. Regras de operação

Os aproveitamentos hidrelétricos em estudo são operados a fio d'água, ou seja, é mantido um nível de água constante. Portanto, considerou-se que os cinco aproveitamentos são operados interdependentemente como um grupo. A regra de liberação é definida no modelo IRAS como uma função do armazenamento total do grupo de reservatórios. Em ambos os cenários, a regra de liberação está localizada no reservatório do grupo mais à jusante. Nesse reservatório onde se encontra a regra de operação, a liberação é definida baseada em um número de zonas de armazenamento conforme a Fig. 18.

FIGURA 18 – Regra de liberação do reservatório São Joaquim (Cenário 1).

Os outros reservatórios do grupo têm sua liberação determinada pelas metas de armazenamento dos reservatórios definidas pelo usuário ou pelas funções de balanço. As funções de balanço, que são definidas para cada período do ano t , indicam o armazenamento “meta” ou desejado em cada reservatório do grupo à montante como função do

armazenamento, a escala baixa está definida como falha ou “vermelha”, a escala média como escala “verde” e a escala superior como escala “amarela”. Isto é, foi escolhida a alternativa 1 da tabela 10. Na Fig. 20, é mostrada a entrada de dados das combinações alternativas das variáveis simuladas. A Fig. 21 apresenta os dados de valores iniciais da variável de afluência para o consumo de água na irrigação, para a hipótese 2 de simulação.

FIGURA 20 – Entrada de dados das combinações utilizadas para as variáveis simuladas.

FIGURA 21 – Valores limites da variável de afluência considerados para irrigação.

7. RESULTADOS

Os resultados do programa IRAS incluem os valores que cada variável simulada assume ao longo da simulação e podem ser visualizados através de uma listagem de valores ou através de gráficos.

Além disso, o modelo calcula os vários índices e funções com que os objetivos da operação do sistema foram satisfeitos. As falhas em um sistema têm três grandes origens principais: carência de água, falhas dos equipamentos e falhas humanas. E os principais parâmetros relacionados com as características mais importantes das falhas são frequência, duração e intensidade ou magnitude. Os índices utilizados para caracterizar frequência, duração e intensidade de falhas são, respectivamente, confiabilidade (probabilidade de não ocorrer uma falha no sistema), resiliência (probabilidade de recuperação do sistema a partir de um estado de falha) e vulnerabilidade (severidade das falhas a que o sistema está sujeito). Definidos os níveis de fornecimento de água, de volume armazenado, de vazão escoada, de energia produzida, o programa calcula, para cada um desses objetivos, índices de confiabilidade e de resiliência, bem como funções de probabilidade de resiliência e de vulnerabilidade.

As simulações foram realizadas para as três hipóteses consideradas na tabela 17, com as configurações do sistema simulado conforme as figuras 6 e 7 (item 6.2). Após a escolha das opções da tabela 10 (neste estudo, é a opção 1, para o armazenamento e a 2, para as demais variáveis) e a atribuição dos valores limites iniciais para cada variável simulada, executou-se os indicadores dinâmicos de resultados da simulação. Os indicadores de resultados detectaram apenas um ponto vermelho no local de consumo de irrigação (para os

dois cenários considerados) e pontos amarelos nos seguintes locais: reservatório de Dourados, reservatório de São Joaquim, reservatório de Anhangüera e locais de consumos urbano e industrial 1 e 2.

A seguir, os indicadores estatísticos, confiabilidade e resiliência, desses locais, são apresentados.

Para o cenário I, que compreende a situação atual do sistema hídrico em estudo, foram obtidos os seguintes resultados:

• Hipótese 1:

FIGURA 22 – Índices de confiabilidade e resiliência no reservatório de Dourados.

Para o reservatório de Dourados, a confiabilidade amarela (Fig. 22) foi de 100%, indicando que os objetivos em relação aos limites escolhidos foram atingidos em sua totalidade para os 18 anos simulados. Enquanto que a confiabilidade verde foi de 60%, indicando que 40% dos valores simulados encontram-se na zona elevada (zona de advertência) da opção 1 (tabela 10). A resiliência amarela desse reservatório foi de 29%, ou

seja, há 29% de probabilidade dos valores simulados que se encontram na zona elevada atingirem a zona média (zona satisfatória). A resiliência vermelha não foi definida, pois não há valores da variável simulada na zona baixa (zona insatisfatória).

A confiabilidade amarela do reservatório de São Joaquim também foi de 100%. E a confiabilidade verde foi de 79%, ou seja, 21% dos valores simulados encontram-se na zona elevada da opção 1 (tabela 10). A resiliência amarela desse reservatório foi de 47%, ou seja, há uma probabilidade de 47% dos valores simulados que se encontram na zona elevada atingirem a zona média. (Fig. 23).

FIGURA 23 – Confiabilidade e resiliência no reservatório de São Joaquim.

A confiabilidade amarela para o consumo na irrigação foi de 75%, indicando que 25% dos valores simulados encontram-se na zona baixa. E a confiabilidade verde foi de 25%, ou seja, 50% dos valores simulados encontram-se na zona média da opção 2 (tabela 10). A resiliência amarela não foi definida (não há probabilidade de um valor que se encontra na zona média atingir a zona elevada). A resiliência vermelha foi de 31%, ou seja, há uma

probabilidade de 31% dos valores simulados que se encontram na zona baixa atingirem a zona média ou a elevada. (Fig. 24).

FIGURA 24 – Confiabilidade e resiliência para o consumo na irrigação.

Para o consumo urbano e industrial 1, a confiabilidade amarela foi de 100%. E a confiabilidade verde foi de 32%. A resiliência amarela foi de 20% (Fig. 25).

FIGURA 25 – Confiabilidade e resiliência para o consumo urbano e industrial 1.

Para o consumo urbano e industrial 2, a confiabilidade amarela foi de 100%. E a confiabilidade verde foi de 82%. A resiliência amarela foi de 81% (Fig. 26).

FIGURA 26 – Confiabilidade e resiliência para o consumo urbano e industrial 2.

Em relação ao consumo na geração de energia elétrica na PCH Dourados, a confiabilidade amarela foi de 97%, enquanto que a confiabilidade verde foi de 70%. A resiliência vermelha foi de 80% e a amarela foi de 30%.

FIGURA 27 – Índices estatísticos para o consumo na geração de energia (Dourados).

Em relação ao consumo na geração de energia elétrica na PCH São Joaquim, a confiabilidade amarela foi de 98%, enquanto que a confiabilidade verde foi de 90%. A resiliência vermelha foi de 100% e a amarela foi de 70%.

FIGURA 28 – Índices estatísticos para o consumo na geração de energia (São Joaquim).

Os resultados obtidos para as demais hipóteses consideradas e para o cenário 2 são mostrados nas tabelas 19 e 20.

TABELA 19 – Índices de confiabilidade e resiliência para o cenário 1

HIPÓTESE 1	Dourados	São Joaquim	Irrigação	Urb. e Ind. 1	Urb. e Ind. 2	Geração (Dourados)	Geração (São Joaq.)
Confiab. Amarela	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,97	0,98
Confiab. Verde	0,60	0,79	0,25	0,32	0,82	0,70	0,90
Resil. Vermelha	-	-	0,31	-	-	0,80	1,00
Resil. Amarela	0,29	0,47	-	0,20	0,81	0,30	0,70
HIPÓTESE 2	Dourados	São Joaquim	Irrigação	Urb. e Ind. 1	Urb. e Ind. 2	Geração (Dourados)	Geração (São Joaq.)
Confiab. Amarela	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,97	1,00
Confiab. Verde	0,60	0,81	0,50	0,44	0,78	0,70	0,89
Resil. Vermelha	-	-	0,31	-	-	0,80	-
Resil. Amarela	0,29	0,56	0,33	0,42	0,83	0,30	0,77
HIPÓTESE 3	Dourados	São Joaquim	Irrigação	Urb. e Ind. 1	Urb. e Ind. 2	Geração (Dourados)	Geração (São Joaq.)
Confiab. Amarela	1,00	1,00	0,67	1,00	1,00	0,97	0,99
Confiab. Verde	0,60	0,64	0,41	0,59	0,80	0,70	0,90
Resil. Vermelha	-	-	0,23	-	-	0,80	1,00
Resil. Amarela	0,29	0,48	-	0,54	0,81	0,30	0,80

Obs.: Os índices de confiabilidade foram de 100% para o consumo de água à jusante.

TABELA 20 – Índices de confiabilidade e resiliência para o cenário 2

HIPÓTESE 1							Geração de energia elétrica				
	Dourados	São Joaq.	Anhang.	Irrig.	Urb. e Ind. 1	Urb. e Ind. 2	Dourados	São Joaq.	Palmeiras	Anhang.	Retiro
Confiab. Amarela	1,00	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98
Confiab. Verde	0,60	0,79	0,45	0,25	0,32	0,86	0,70	0,90	0,90	0,88	0,88
Resil. Vermelha				0,31			0,80	1,00	1,00	1,00	1,00
Resil. Amarela	0,29	0,47	0,37		0,20	0,89	0,30	0,70	0,70	0,71	0,71
HIPÓTESE 2											
	Dourados	São Joaq.	Anhang.	Irrig.	Urb. e Ind. 1	Urb. e Ind. 2	Dourados	São Joaq.	Palmeiras	Anhang.	Retiro
Confiab. Amarela	1,00	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,97	1,00	1,00	0,98	0,98
Confiab. Verde	0,60	0,81	0,53	0,50	0,44	0,83	0,70	0,89	0,89	0,87	0,87
Resil. Vermelha				0,31			0,80	-	-	1,00	1,00
Resil. Amarela	0,29	0,46	0,46	0,33	0,34	0,83	0,30	0,77	0,77	0,72	0,72
HIPÓTESE 3											
	Dourados	São Joaq.	Anhang.	Irrig.	Urb. e Ind. 1	Urb. e Ind. 2	Dourados	São Joaq.	Palmeiras	Anhang.	Retiro
Confiab. Amarela	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,00	0,97	0,99	0,99	0,99	0,98
Confiab. Verde	0,60	0,64	0,49	0,41	0,59	0,84	0,70	0,90	0,89	0,87	0,86
Resil. Vermelha				0,23			0,80	1,00	1,00	1,00	1,00
Resil. Amarela	0,29	0,48	0,43		0,54	0,84	0,30	0,80	0,80	0,80	0,69

Obs.: Os índices de confiabilidade foram de 100% para o consumo de água à jusante e para os reservatórios de Palmeiras e Retiro.

7.1. Distribuições da probabilidade da vulnerabilidade e da resiliência

Além dos índices estatísticos, o modelo IRAS fornece, como dados de saída, as distribuições da probabilidade da vulnerabilidade e da resiliência para as variáveis simuladas. As distribuições da probabilidade da resiliência indicam a probabilidade de várias seqüências contínuas de valores insatisfatórios (na zona vermelha ou na amarela). As distribuições da probabilidade da vulnerabilidade indicam a probabilidade de várias magnitudes de valores insatisfatórios, ou seja, desvios dos valores limites iniciais (para a zona vermelha ou amarela) que ocorram.

Nas figuras que apresentam essas distribuições de probabilidade de falhas pode-se definir como: Advertência ou “Warning”, uma falha de abastecimento de menos de 25% do objetivo do consumo definido e também quando mais de 75% do volume requerido é satisfeito; e como Falha ou “Failure”, uma falha de mais de 25% do objetivo do consumo.

São apresentadas, a seguir, essas distribuições, para o cenário 2 e hipótese 1 simulada.

Para o armazenamento no reservatório de Dourados (Fig. 29), a distribuição da probabilidade da resiliência é mostrada no canto superior esquerdo da figura, indicando as probabilidades de ocorrência de advertências com diversas durações em vários períodos (meses), com probabilidade máxima de 20% no quarto período. No canto superior direito, é apresentada a probabilidade de ocorrência de advertência de vulnerabilidade, com probabilidade máxima de 40% correspondente à magnitude de 0,003 (hm³/mês). No canto inferior esquerdo, indica-se a probabilidade de ocorrência de advertência consecutiva de vulnerabilidade com probabilidade máxima de 40% correspondente à magnitude de cerca de 1,5 (hm³/ano). No canto inferior direito, apresentam-se as probabilidades condicionadas de advertência de resiliência ocorridas em vários períodos, sendo a probabilidade máxima de aproximadamente 53% para o período 4.

FIGURA 29 – Probabilidade em relação ao armazenamento de Dourados.

Em relação ao armazenamento no reservatório de São Joaquim (Fig. 30), apresenta-se, no canto superior esquerdo da figura, a distribuição da probabilidade da resiliência, indicando as probabilidades de ocorrência de advertências nos períodos de 1 a 3, com probabilidade máxima de aproximadamente 15% no período 3. No canto superior direito, a probabilidade máxima de ocorrência advertência de vulnerabilidade é de 20% correspondente à magnitude de 0,20 ($\text{hm}^3/\text{mês}$). No canto inferior esquerdo, indica-se a probabilidade de ocorrência de advertência consecutiva de vulnerabilidade com probabilidade máxima de 20% correspondente à magnitude de cerca de 1,0 (hm^3/ano). No canto inferior direito, apresentam-se as probabilidades condicionadas de advertências de resiliência para três períodos, sendo a probabilidade máxima de aproximadamente 70% para o período 3.

FIGURA 30 – Probabilidade em relação ao armazenamento de São Joaquim.

Na Fig. 31, são apresentadas as probabilidades para o armazenamento no reservatório de Anhanguera. No canto superior esquerdo da figura, tem-se a distribuição da probabilidade da resiliência, indicando as probabilidades de ocorrência de advertências com diversas durações em oito períodos, sendo que a probabilidade máxima de aproximadamente 15% ocorre no quarto período. No canto superior direito, a probabilidade máxima de ocorrência de advertência de vulnerabilidade é de cerca de 56% correspondente à magnitude de 0,40. No canto inferior esquerdo, indica-se a probabilidade de ocorrência de advertência consecutiva de vulnerabilidade com probabilidade máxima de 56% correspondente à magnitude de cerca de 2,0. No canto inferior direito, apresentam-se as probabilidades condicionadas de advertências de resiliência ocorridas em oito períodos, sendo a probabilidade máxima de aproximadamente 28% para o período 4.

FIGURA 31 – Probabilidade em relação ao armazenamento de Anhanguera.

Em relação às afluições para irrigação (Fig. 32), a distribuição da probabilidade da resiliência é mostrada no canto superior esquerdo da figura, indicando as probabilidades de ocorrência de falhas e advertências com diversas durações em seis períodos (meses). O período 3, apresenta uma falha máxima de aproximadamente 28%, enquanto que uma advertência de resiliência com probabilidade de 50% é apresentada no sexto período. No canto superior direito, são mostradas probabilidades de ocorrência de falha e advertência de vulnerabilidade, com advertência com probabilidade máxima de 50% correspondente à magnitude de 2 ($\text{hm}^3/\text{mês}$) e com falha com probabilidade de aproximadamente 26% correspondente à magnitude de 16 (hm^3/ano). No canto inferior esquerdo, indica-se a probabilidade de ocorrência de falha consecutiva de vulnerabilidade com probabilidade máxima de 75% correspondente à magnitude de cerca de 50 (hm^3/ano). No canto inferior direito, apresentam-se as probabilidades condicionadas de falha e advertência de resiliência ocorridas em dois períodos, sendo as probabilidades máximas de aproximadamente 35% para o período 3 (falha) e 68%, para o sexto período (advertência).

FIGURA 32 – Probabilidade de afluências para a irrigação.

Na Fig. 33, são apresentadas as probabilidades de ocorrência de advertências de resiliência e vulnerabilidade em relação às afluências para o consumo urbano e industrial (1). No canto superior esquerdo da figura, tem-se a distribuição da probabilidade da resiliência, indicando as probabilidades de ocorrência de advertências em vários períodos, com probabilidade máxima de aproximadamente 22% no período 9. No canto superior direito, a probabilidade máxima de ocorrência advertência de vulnerabilidade é de 70% correspondente à magnitude de 2. No canto inferior esquerdo, indica-se a probabilidade de ocorrência de advertência consecutiva de vulnerabilidade com probabilidade máxima de 70% correspondente à magnitude de aproximadamente 10. No canto inferior direito, apresentam-se as probabilidades condicionadas de advertências de resiliência em diversos períodos, sendo a probabilidade máxima de aproximadamente 30% para o período 9.

FIGURA 33 – Probabilidade de afluições em relação ao consumo urbano e industrial (1).

Em relação às afluições para o consumo urbano e industrial (2), são apresentadas as probabilidades de ocorrência de advertências de resiliência e vulnerabilidade (Fig. 34). No canto superior esquerdo da figura, apresentam-se as probabilidades de ocorrência de advertências em dois períodos, com probabilidade máxima de aproximadamente 10% no primeiro período. No canto superior direito, a probabilidade máxima de ocorrência advertência de vulnerabilidade é de 13% correspondente à magnitude de 2. No canto inferior esquerdo, indica-se a probabilidade de ocorrência de advertência consecutiva de vulnerabilidade com probabilidade máxima de 13% correspondente à magnitude de aproximadamente 10. No canto inferior direito, têm-se as probabilidades condicionadas de advertências de resiliência para dois períodos, sendo a probabilidade máxima de aproximadamente 80% para o período 1.

FIGURA 34 – Probabilidade de afluências em relação ao consumo urbano e industrial (2).

8. CONCLUSÕES

Neste estudo de simulação computacional, consideraram-se duas séries de aflúncias e três hipóteses sobre a distribuição ao longo do ano do consumo de irrigação. As simulações foram realizadas para dois cenários considerados. O cenário 1 representa a situação atual do sistema de recursos hídricos em estudo, enquanto que o cenário 2 representa a situação futura, ou seja, com a instalação de três novas pequenas centrais elétricas, PCH Palmeiras, PCH Anhanguera e PCH Retiro, no sistema hídrico em análise.

Analisando os resultados de saída do modelo, conclui-se que os índices de desempenho, ou seja, a confiabilidade, a resiliência e a vulnerabilidade, não são significativamente diferentes para as três hipóteses consideradas. Os resultados não variam muito com a distribuição ao longo do ano do consumo para irrigação. Apenas para a hipótese 3, onde há uma concentração do consumo anual de irrigação em apenas 3 meses, é que uma diferença mais representativa em relação às demais hipóteses é apresentada.

Para o cenário 1, os índices de desempenho obtidos para o reservatório de Dourados apresentam os mesmos valores para as três hipóteses consideradas. Os resultados apresentam índices de confiabilidade de 100% e 60% para o armazenamento do reservatório de Dourados. A resiliência para a recuperação do sistema é de 29%, uma recuperação pequena em relação ao armazenamento em Dourados.

Para o reservatório de São Joaquim, observa-se que os maiores índices de confiabilidade são obtidos para a hipótese 2 considerada. Os resultados mostram confiabilidade de 100% e 81%. A resiliência para a recuperação do sistema em relação ao armazenamento de São Joaquim é de 56%, uma recuperação um pouco acima da média.

Em relação ao consumo na irrigação, os resultados dos índices estatísticos são muito próximos, exceto para a hipótese 3, onde se apresentam índices de confiabilidade menores, cerca de 67% e 41%. Os melhores resultados de confiabilidade e resiliência para irrigação são de 75% e 50%, sendo que apenas o primeiro valor (75%) encontra-se na faixa de valores mínimos de confiabilidade para irrigação, já definida anteriormente. A resiliência para recuperação do sistema é de 31% e 33%.

Para o consumo no abastecimento urbano e industrial (1), a hipótese 3 é a que apresenta os melhores índices de confiabilidade e resiliência. Os resultados mostram confiabilidade de 100% e 59% e resiliência de 54%, indicando uma recuperação um pouco acima da média em relação ao consumo urbano e industrial (1). Em relação ao consumo urbano e industrial (2), os melhores índices de confiabilidade, 100% e 82%, são apresentados para a hipótese 1.

Os resultados deste estudo, para as hipóteses consideradas, indicam índices de confiabilidade de 97% e 70%, para o funcionamento do sistema de geração de energia elétrica da PCH Dourados. Esses resultados apresentam-se acima do intervalo de valores mínimos de confiabilidade para geração de energia elétrica. A resiliência para a recuperação do sistema é 80% e 30%. Para a geração de energia elétrica em São Joaquim, os índices de confiabilidade variam muito pouco para as três hipóteses. Essa variabilidade é de aproximadamente 1%. Os índices estão compreendidos entre 89% e 100%, indicando que há grande confiabilidade do sistema de geração de energia na PCH São Joaquim.

Comparando os resultados de confiabilidade obtidos nas simulações dos cenários 1 e 2, observou-se que não apresentam muita variabilidade. Uma pequena diferença foi observada entre os resultados referentes ao consumo no abastecimento urbano e industrial (2). O índice de confiabilidade verde e de resiliência amarela, para o cenário 1, são de 82% e 81%, respectivamente. Com a instalação das três novas PCHs (cenário 2), esses índices passam a ser de 86% e 89%. Isto significa que o reservatório de Anhanguera, utilizado para

abastecimento do consumo urbano e industrial (2), contribui para uma maior confiabilidade do sistema.

No cenário 2, em relação aos índices de confiabilidade e resiliência para o armazenamento em Anhanguera, os melhores resultados são obtidos para a hipótese 2. Têm-se índices de confiabilidade de 100% e 53% e um resiliência de 46%, apresentando uma recuperação um pouco abaixo da média.

Para a geração de energia elétrica nas PCHs Palmeiras, Anhanguera e Retiro, os índices de confiabilidade e de resiliência apresentam-se com pouca diferença. Observam-se índices de confiabilidade que variam de 100% a 89%. Tais índices mostram-se muito acima do valor mínimo considerado para confiabilidade para geração de energia.

No que diz respeito à vulnerabilidade, ou seja, a severidade das falhas em percentagem do volume das necessidades que são efetivamente satisfeitas, o reservatório de Dourados apresenta os mesmos resultados para as três hipóteses simuladas. A probabilidade de ocorrência de advertência de resiliência com probabilidade máxima de 20% ocorre no quarto período (mês). A probabilidade condicionada de ocorrência de advertência de resiliência atinge aproximadamente 53%. A probabilidade máxima de ocorrência de advertência de vulnerabilidade é de 40% correspondente à magnitude de 0,003 ($\text{hm}^3/\text{mês}$). Além disso, é apresentada uma probabilidade máxima de ocorrência de advertência consecutiva de vulnerabilidade de 40% correspondente à magnitude de 1,5 (m^3/ano).

Em relação ao armazenamento no reservatório de São Joaquim, os melhores resultados referentes às distribuições de probabilidade de resiliência e vulnerabilidade são obtidos para as simulações das hipóteses 1 e 2. A distribuição de probabilidade de resiliência indica uma probabilidade máxima de ocorrência de advertência de resiliência de 15%. A probabilidade de ocorrência de advertência de vulnerabilidade é de no máximo 20% correspondente à magnitude de 0,20 ($\text{hm}^3/\text{mês}$). A probabilidade de ocorrência de advertência consecutiva de vulnerabilidade é de aproximadamente 20% correspondente à magnitude de 1,0 (hm^3/ano). A probabilidade condicionada de ocorrência de advertência de resiliência é de no máximo 70%.

Para o reservatório de Anhanguera, a simulação da hipótese 2 fornece melhores resultados de vulnerabilidade. A distribuição de resiliência indica a probabilidade de ocorrência de advertência com uma duração máxima de 12%. A probabilidade condicionada de ocorrência de advertência de resiliência atinge aproximadamente 25%. A probabilidade máxima de ocorrência de advertência de vulnerabilidade é de 48% correspondente à magnitude de 0,40 ($\text{hm}^3/\text{mês}$). Além disso, é apresentada uma probabilidade máxima de ocorrência de advertência consecutiva de vulnerabilidade de 48% correspondente à magnitude de 2,0 (m^3/ano).

De uma forma geral, a vulnerabilidade e a resiliência nos reservatórios de Dourados, São Joaquim e Anhanguera são baixas, isto se deve, sobretudo, a serem estes reservatórios de pequenas dimensões.

A afluência para irrigação, apresenta os melhores resultados de vulnerabilidade e resiliência na simulação da hipótese 2. As probabilidades de ocorrências de falhas e advertências de resiliência apresentam probabilidade máxima de 25%. As probabilidades de falhas e advertências têm probabilidade máxima de 25% correspondente à magnitude de 8. As probabilidades de ocorrência de falhas e advertências consecutivas de vulnerabilidade atingem no máximo 35% correspondente à magnitude de 24. As probabilidades condicionadas de falhas e advertências de resiliência apresentam uma probabilidade máxima de 50%.

Observa-se que a vulnerabilidade e a resiliência, em relação às afluências utilizadas para sistema de irrigação estudado, não são altas se considerarmos o consumo de água para irrigação.

Em relação à afluência para o consumo urbano e industrial (1), tem-se as melhores distribuições de probabilidade de resiliência e vulnerabilidade para a hipótese 3. Os resultados incluem probabilidades de advertência de resiliência com probabilidade máxima de 13%. A probabilidade de ocorrência de advertência de vulnerabilidade é de no máximo 40%. A probabilidade de advertência consecutiva de vulnerabilidade atinge probabilidade

máxima de 40%. As probabilidades condicionadas de ocorrência de advertências são de no máximo 70%.

Para o consumo urbano e industrial (2), a vulnerabilidade é baixa, aproximadamente 13%, para a hipótese 1. A distribuição de probabilidade de ocorrência de advertência de resiliência também é baixa, atinge no máximo 10% e a probabilidade condicionada de advertência tem probabilidade máxima de 70%.

A vulnerabilidade do sistema de abastecimento urbano e industrial, tanto para o (1) como para o (2), é relativamente baixa, uma vez que a disponibilidade de água é muito superior ao volume mínimo necessário para suprir estas demandas.

Para a geração de energia elétrica das cinco PCHs estudadas, as probabilidades de ocorrência de advertências de resiliência e de vulnerabilidade são praticamente insignificantes, variando de 3% a 6%.

Analisando os índices de desempenho, de uma forma geral, observa-se que tanto no cenário 1 como no cenário 2, os resultados indicam confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade com bons percentuais, principalmente no que se refere à geração de energia nas PCHs envolvidas. Embora em relação às afluências para a irrigação ocorram confiabilidades muito abaixo do intervalo de valores mínimos de confiabilidade para irrigação definido anteriormente.

De uma maneira geral, foi possível quantificar os usos e os parâmetros em relação à confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade do sistema estudado, o que possibilita um planejamento de reservatórios à jusante das PCHs Dourados e São Joaquim, a fim de atender a demanda para usos em irrigação, abastecimento urbano e industrial e geração de energia elétrica. Em eventuais crises de déficit hídrico, a quantificação e os demais parâmetros podem vir a ser úteis num eventual bombeamento de água para Dourados e São Joaquim. Convém ressaltar que o modelo IRAS realiza este tipo de simulação.

Além disso, recomenda-se que futuros trabalhos, a serem desenvolvidos a partir deste, utilizem a simulação qualitativa da água, uma vez que se constata a existência de uma grande

parcela de água para irrigação, o que provavelmente acarreta uma lixiviação, que pode vir a causar danos ambientais ao sistema hídrico estudado. Também é recomendada a realização de um levantamento de dados mais preciso, com coleta de campo e visitas a produtores rurais, para proporcionar resultados mais representativos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNOLD, J. G.; SAMMONS, N. B. (1988). Decision support system for selecting inputs to a basin scale model. *Water Resources Bulletin*, v. 24, n. 4, p. 749-758. Ago.

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

AZEVEDO, Luiz G. T. ; PORTO, Rubem L. L. ; PORTO, Mônica. (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 – RBRH*, v. 3, n. 1, p. 21-51. Jan./Mar.

BAFFAUT, C.; DELLEUR, J. W. (1989). Expert System for Calibrating SWMM. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 115, n. 3, p. 278-298. Maio.

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

BELAINEH, Getachew ; PERALTA, Richard C.; HUGHES, Trevor C. (1999). Simulation/Optimization Modeling for Water Resources Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 125, n. 3, p. 154-161. Maio/Jun.

BENETT, Michael et al.(1994). Simulating Water Supply Systems of the Raritan Basin. In: 21st ANNUAL CONFERENCE, ASCE, Denver CO, p. 433-436. Maio 23-26.

BRAGA, B. P. F. (1987). Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. In: *Modelos de Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 1, Nobel/ ABRH.

BRAGA, B.; BARBOSA, P. S.; NAKAYAMA, P. T. (1998). Sistemas de suporte à decisão em Recursos Hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. 3, p. 73-95. Jul/Set.

BURAS, Nathan. (1972). Scientific allocation of water resources. American elsevier publishing company, inc. New York.

CARMO, M. B. (1997). *Otimização e Simulação do Sistema Hidroelétrico do alto Cunene*. Dissertação (Mestrado) – IST, UTL, Lisboa.

CHANDRAMOULI, V.; RAMAN, H. (2001). Multireservoir Modeling with Dynamic Programming and Neural Network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 127, n. 2, p. 89-98. Mar./Abr.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SAPUCAÍ-MIRIM/GRANDE. Relatório Zero: Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do plano da bacia hidrográfica do Sapucaí-Mirim/Grande. (CD-ROM). 1999.

- \ CUNNINGHAM, Alfred B.; AMEND, John R. (1986). Interactive Simulation of Water Resource Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 115, n. 3, p. 326-337. Jul.
- DANDY, G. C.; CONNARTY, M. C.; LOUCKS, D. P. (1997). Comparison of Methods for Yield Assessment of Multiple Reservoir Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n. 6, p. 350-358. Nov./Dez.
- ✓ DYRBAK, L. (2000). Reservoir operation optimization. Dept of Hydrodynamics and Water Resources, July. <http://www.dhisoftware.com/mikebasin/News/DyrbakReport.htm> (19 mar de 2001)
- ESCHENBACH, E. A.; MAGEE, T.; ZAGONA, E.; GORANFLO, M.; SHANE, R. (2001). Goal Programming Decision Support Systems for Multiobjective Operation of Reservoir Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 127, n. 2, p. 108-120. Mar./Abr.
- GOULTER, Ian C.; A. M. ASCE ; WEBB, Bruce (1983). Water Allocation Conflicts on the Canadian Prairies. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 109, n. 2, p. 147-163. Abr.
- GRIGG, Neil S. (1996). Water Resources Management: principles, regulations and cases. McGraw-Hill, Inc.
- GRYGIER, Jan C.; STEDINGER, Jery R. (1985). Algorithms for Optimizing Hydropower System Operation. *Water Resources Research*, v. 21, n. 1, p. 1-10. Jan.

HALL, Warren A.; DRACUP, John A. (1970). *Water Resources Systems Engineering*. McGraw-Hill, Inc.

HUFSCHEIDT, Maynard M.; FIERING, Myron B. (1966). *Simulation Techniques for Design of Water Resources Systems*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.

IRAS – Interactive River-Aquifer Simulation (1994). Cornell University and Resources Planning Associates, Incorporated. Version: 1.00.

ITO, K. et al. (2001). Decision Support System for Surface Water Planning in River Basins. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 127, n. 4, p. 272-276. Jul/Aug.

JONG, R. L. de (1988). Multiobjective Water Planning in the G. C. C. Region. In: 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE: COMPUTER METHODS AND WATER RESOURCES, Marrocos. *Anais*. OUAZAR, D.; BREBBIA, C. A.; STOUT, G. E. v. 6, p. 145-162.

KESHARI, Ashok K. (2000). Discussion of “Optimal Allocation of Water Withdrawals in River Basin”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 126, n. 1, p. 37-38. Jan./Fev. / paper by JACOBS, Jennifer M. ; VOGEL, Richard M. (1998). *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 124, n. 6, Nov./Dez.

LARSON, R. E.; KECKLER, W. G. (1969). Application Dynamic Programming to the Control of Water Resources Systems. *Automatic*, v. 5, p. 15-26.

LOUCKS, Daniel P. (1983). Computer Models for Reservoir Regulation. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, v. 94, n. SA4, p. 657-669. Ago.

LOUCKS, Daniel P.; DORFMAN, Philip J. (1975). An evaluation of some linear decision rules in chance-constrained models for reservoir planning and operation / Editorial /. *Water Resources Research*, v. 11, n. 6, p. 777-782. Dez.

LOUCKS, Daniel P.; FALKSON, L. M. (1970). A comparison of some dynamic, linear and policy iteration methods for reservoir operation. *Water Resources Bulletin*, v. 6, n. 3, p. 384-400. Maio/Jun.

LOUCKS, Daniel P.; STAKHIV, Eugene Z.; MARTIN, Lynn R. (2000). Editorial: Sustainable Water Resources Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 126, n. 2, p. 43-47. Mar./Abr.

LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R. ; HAITH, D. A. (1981). *Water Resource Systems Planning and Analysis*. Prentice Hall, Inc., Englewood, Cliffs, N. J.

MARTIN, Quentim W. (1983). Optimal Operation of Multiple Reservoir. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 109, n. 1, p. 58-74. Jan.

MAUAD, Frederico Fábio. (1995). *Estudo de uma turbina de reação com pá de simples curvatura para utilização no meio rural*. 128p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Escola Federal Engenharia de Itajubá.

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

MEDEIROS, Yvonilde D. P. (1985). *Aplicação da Programação Linear Inteira 0 (zero) e 1 (um) na otimização de sistemas de recursos hídricos a múltiplos propósitos*. 200p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, Universidade de São Paulo - USP.

MEREDITH, D. D. (1975). Optimal Operation of Multiple Reservoir System. *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, v. 101, n. HY2, p. 299-312.

METAS SYSTEMS INC. (1975) *Systems Analysis in Water Resources Planning*. Water Information Center, Inc. Port Washington, New York.

MOHAMMADI, B.; MARÍÑO, M. A. (1984). Reservoir Operation: Choice of Objective Functions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 110, n. 1, p. 15-29. Jan.

MOHAN, S.; RAIPURE, Diwakar M. (1992). Multiobjective Analysis of Multireservoir System. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 118, n. 4, p. 356-370. Jul./Ago.

MOY, Wai-Sec ; COHON, Jared L.; REVELLE, Charles S. (1986). A programming model for analysis of the reliability, resilience and vulnerability of a water supply reservoir. *Water Resources Research*, v. 22, n. 4, p. 489-498. Abr.

OLIVEIRA, R. (1995). Simulação do Empreendimento de Alqueva. Relatório 333/95, LNEC.

Planejamento e Gestão. <http://www.daee.sp.gov.br>. (20 Nov. 2000).

PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS: primeiro plano do Estado de São Paulo, DAEE, 1990.

Plano Estadual de Recursos Hídricos (2000-2003). Sistemas de Informações para Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. (CD-ROM).

PORTO, Rubem La Laina e et al. (1997). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Editora Universidade /UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre.

REDE DAS ÁGUAS. http://www.rededasaguas.org.br/quest/quest_04.asp. (9 de Fev. 2002)

Relatório Final do Projeto Básico: Aproveitamento Hidrelétrico do Rio Sapucaí.(2001). v.1 e 2. Desenvolvido pela Companhia Paulista de Força e Luz-CPFL e ENGEVIX Engenharia S/C LTDA.

Relatório Final do Projeto Básico: Aproveitamento Hidrelétrico do Rio Sapucaí.(1989). v.1. Desenvolvido pela Companhia Paulista de Força e Luz-CPFL e ENGE-RIO Engenharia e Consultoria.

ROSA, Evana; VIANA, Fabiana G. (1999). O papel das PCHs no mercado de energia brasileiro. *CERPCH Notícias*, n. 4, p. 5, set/ out/ nov/ dez.

SEMINÁRIO: PERSPECTIVAS DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DE SÃO PAULO. São Paulo, 1986. *Anais*. 13 a 15 out. DAEE/ FCTH/FUNDAP.

SIGVALDASON, O. T. (1976). A Simulation Model for Operation a Multipurpose Multireservoir System. *Water Resources Research*, v. 12, n. 2, p. 263-278. Abr.

SOARES, S.; FILHO, M.G. A. (1988). Optimal Multiobjective Operation Planning of a Water Resources System. In: 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE: COMPUTER METHODS AND WATER RESOURCES, Marrocos. *Anais*. OUAZAR, D.; BREBBIA, C. A.; STOUT, G. E. v. 6, p. 127-134.

SRINIVASAN, K. e et al. (1999). Mixed-integer programming model for reservoir performance optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 125, n. 5, p. 298-301. Set./Out.

SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO.
<http://www.biotasp.org.br/biodiv/mapas/bacias>.

SZIDAROVSKY, F.; GERSHO, M. E.; DUCKSTEIN, L. (1986). *Techniques for Multiobjective Decision Making in Systems Management*. Elsevier, New York.

TAUXE, G. W.; MADES, D. M.; INMAN, R. R. (1980). Multiple Objectives in Reservoir Operation. *Journal of Water Resources Planning and Management Division*, v. 106, n. WR1, p. 225-238.

TAYLOR, Marshall R.; LOUCKS, Daniel P.; FRENCH, Peter N. (1998) Quantifying policy reliability, resilience and vulnerability in IRAS. <http://www.englib.cornell.edu/col>.

TUCCI, Carlos E. M. (1987). Modelos Determinísticos. In: *Modelos de Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 1, Nobel/ ABRH.

TUCCI, Carlos. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Ed. Universidade/ UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca (1996). *Diretrizes para elaboração de dissertações e teses na EESC-USP*. São Carlos.

YEH, William W-G. (1985). Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review. *Water Resources Research*, v. 21, n. 12, p. 1797-1818. Dez.

YEH, W.; BECKER, Leonard (1982). Multiobjective Analysis of Multireservoir Operations. *Water Resources Research*, v. 18, n. 5, p. 1326-1336. Out.

10. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

PEIXOTO, Luciana S.; LIMA, Guilherme de; MAUAD, Frederico Fábio.(2001). O Uso do Software IRAS no Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos. In: XXII IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATION METHODS IN ENGINEERING, Campinas-SP.

LIMA, Guilherme de; PEIXOTO, Luciana S.; MAUAD, Frederico F. (2001). A Aplicação do Modelo de Simulação MIKE BASIN 2000 no Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos. In: XXII IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHOS IN ENGINEERING, Campinas-SP.

LIMA, G.; PEIXOTO, L. S.; MAUAD, F. F. (2001). Modelos de Simulação no Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECUROS HÍDRICOS E V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, Aracajú-SE.

LIMA, G.; PEIXOTO, L. S.; MAUAD, F. F. (2001). Simulação de Bacias Hidrográficas utilizando o Modelo Matemático MIKE BASIN 2000. In: IV SEMANA DE ENGENHARIA DA UNISANTOS – Universidade Católica de Santos, Santos-SP.

ANEXO A: Processo de interpolação utilizado no modelo IRAS para definição da regra de operação de reservatórios.

A liberação do reservatório em cada etapa de tempo de simulação tt depende da zona de armazenamento z aplicável no período do ano. Para identificar essa zona, os limites de volume de armazenamento, $S_{mn}(n, z, tt)$ e $S_{mx}(n, z, tt)$, de cada zona z no início da etapa de tempo de simulação tt no período do ano t da simulação são determinadas por interpolação.

FIGURA 4 – Processo de interpolação utilizado no modelo IRAS.

Seja $FS(tt, t)$ a fração do período do ano já simulado no início da etapa de tempo da simulação tt no período do ano t .

$$FS(tt, t) = \{ \text{tempo simulado no período } t \text{ no início de } tt / \text{duração total de } t \} \quad (16)$$

Então,

$$S_{mn}(n, z, tt) = BS_{mn}(n, z, t) + \{ FS(tt, t) \bullet (ES_{mn}(n, z, t) - BS_{mn}(n, z, t)) \} \quad (17)$$

$$S_{mx}(n, z, tt) = BS_{mx}(n, z, t) + \{ FS(tt, t) \bullet (ES_{mx}(n, z, t) - BS_{mx}(n, z, t)) \} \quad (18)$$

A zona de armazenamento z contendo o volume de armazenamento inicial, $S(n, tt)$, é identificada, verificando se o volume inicial $S(n, tt)$ está dentro da variação dos volumes de armazenamento $S_{mn}(n, z, tt)$ e $S_{mx}(n, z, tt)$ de cada zona z de período do ano aplicável. Uma vez que a zona z tenha sido identificada, as metas de liberação do reservatório, $R_{mn}(n, z, tt)$ e $R_{mx}(n, z, tt)$, associadas aos limites de volumes de armazenamento interpolados, $S_{mn}(n, z, tt)$ e $S_{mx}(n, z, tt)$, são calculados pelas seguintes expressões:

$$R_{mn}(n, z, tt) = BR_{mn}(n, z, t) + \{ FS(tt, t) \bullet (ER_{mn}(n, z, t) - BR_{mn}(n, z, t)) \} \quad (19)$$

$$R_{mx}(n, z, tt) = BR_{mx}(n, z, t) + \{ FS(tt, t) \bullet (ER_{mx}(n, z, t) - BR_{mx}(n, z, t)) \} \quad (20)$$

Em seguida, a liberação diária, $R(n, tt)$, para a etapa de tempo de simulação é determinada pela interpolação dentro da zona z que contém o volume de armazenamento inicial, $S(n, tt)$.

$$R(n, tt) = R_{mn}(n, z, tt) + [\{S(n, tt) - S_{mn}(n, z, tt)\} / \{S_{mx}(n, z, tt) - S_{mn}(n, z, tt)\}] \bullet \{R_{mx}(n, z, tt) - R_{mn}(n, z, tt)\} \quad (21)$$

Se todos os valores de liberação, ($BR_{mn}(n, z, t)$, $ER_{mn}(n, z, t)$, $BR_{mx}(n, z, t)$, $ER_{mx}(n, z, t)$), em qualquer zona z , são os mesmos, então a liberação é fixada nesse valor para qualquer volume de armazenamento, $S(n, tt)$, na zona. Esta é uma condição comum de muitas regras de liberação de reservatório.

A afluência ou liberação conduzida pelo fornecimento, $QO'(n, tt)$, do reservatório n na etapa de tempo de simulação tt será a meta de liberação computada, $R(n, tt)$, se água suficiente está disponível, a água adicional vertida, do armazenamento em excesso da capacidade do reservatório, $Cap(n)$, ou a liberação mínima diária requerida definida pelo usuário, $R_{mn}(n, t)$. Se a liberação for maior que aquela disponível no armazenamento, somente o volume de armazenamento disponível será liberado.

$$QO'(n, tt) = \max \{S(n, tt) - Cap(n), \min [S(n, tt), \max \{R_{mn}(n, t), R(n, tt)\}]\} \quad (22)$$

ANEXO B: Geração das séries de vazões dos postos fluviométricos, Fazenda Velha e Buriti, através do Modelo Multivariado Autoregressivo de 1ª ordem.

Foram consideradas, na geração das vazões, as séries históricas de quatro postos fluviométricos pertencentes à Bacia Hidrográfica do Sapucaí/Grande. São eles:

- Fazenda Velha (1931-1945) e Pioneiros (1945-1970), localizados no Rio Sapucaí;
- Buriti (1982-1997), situado no Ribeirão do Buriti e
- Guará (1981-1999), localizado no Ribeirão da Estiva.

Na figura 10, é mostrada a localização desses postos.

FIGURA 35 – Postos fluviométricos utilizados na geração de vazões.

O Modelo Multivariado Autoregressivo (MVAR) de 1ª ordem foi utilizado na geração das vazões para o período de 1982-1999. A aplicação do modelo MVAR foi feita segundo a seguinte expressão:

$$Z(t) = A Z(t-1) + B \epsilon(t) \quad (23)$$

Handwritten: Fan

onde: $Z(t)$ = vetor de vazões nos 4 postos no tempo t

$\epsilon(t)$ = vetor de ruídos brancos, média 0 e desvio padrão 1;

A e B = matrizes $n \times n$, sendo n o número de postos analisados;

$Z(t-1)$ = vetor de vazões nos 4 postos no tempo $(t-1)$

O modelo MVAR é um modelo estocástico aplicado a séries estacionárias. Entretanto, as séries históricas dos postos mencionados apresentam um comportamento não-estacionário. Logo, foi necessário transformar as séries originais em séries estacionárias, para posterior aplicação do modelo. Assim, o primeiro passo para a geração das vazões foi a criação de séries estacionárias para os postos analisados.

A sequência da geração do modelo multivariado de 1ª ordem é descrita a seguir.

Passo 1: Geração das séries dessazonalizadas, através do método da padronização.

As séries foram transformadas segundo a equação apresentada a seguir, para que fosse eliminada a sazonalidade, através da média e do desvio padrão.

$$z_t = \frac{(x_{t,j} - \bar{x}_j)}{\sigma_j}$$

onde: Z_t = variável com média zero e desvio padrão 1.

$X_{t,j}$ = série observada referente ao mês j no tempo t

$\bar{x}_j$ = média do mês j

σ_j = desvio padrão do mês j

Passo 2: Cálculo das matrizes A e B.

As matrizes A e B são relacionadas aos Momentos das Variáveis, M_0 e M_1 , através das seguintes equações:

$$M_0 = AM_1^T + BB^T \quad \text{e} \quad M_1 = AM_0$$

Logo, temos que:

$$BB^T = M_0 - AM_1^T \quad \text{e} \quad A = M_1 M_0^{-1}$$

Cálculo dos valores de M_0 e M_1 :

As matrizes M_0 e M_1 , função de médias do produto dos vetores Z de cada posto, são representadas da seguinte forma:

$$M_0 = \begin{bmatrix} \overline{z_1(t)z_1(t)} & \overline{z_1(t)z_2(t)} & \overline{z_1(t)z_3(t)} & \overline{z_1(t)z_4(t)} \\ \overline{z_2(t)z_1(t)} & \overline{z_2(t)z_2(t)} & \overline{z_2(t)z_3(t)} & \overline{z_2(t)z_4(t)} \\ \overline{z_3(t)z_1(t)} & \overline{z_3(t)z_2(t)} & \overline{z_3(t)z_3(t)} & \overline{z_3(t)z_4(t)} \\ \overline{z_4(t)z_1(t)} & \overline{z_4(t)z_2(t)} & \overline{z_4(t)z_3(t)} & \overline{z_4(t)z_4(t)} \end{bmatrix}$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} \overline{z_1(t)z_1(t-1)} & \overline{z_1(t-1)z_2(t)} & \overline{z_1(t-1)z_3(t)} & \overline{z_1(t-1)z_4(t)} \\ \overline{z_2(t-1)z_1(t)} & \overline{z_2(t-1)z_2(t)} & \overline{z_2(t-1)z_3(t)} & \overline{z_2(t-1)z_4(t)} \\ \overline{z_3(t-1)z_1(t)} & \overline{z_3(t-1)z_2(t)} & \overline{z_3(t-1)z_3(t)} & \overline{z_3(t-1)z_4(t)} \\ \overline{z_4(t-1)z_1(t)} & \overline{z_4(t-1)z_2(t)} & \overline{z_4(t-1)z_3(t)} & \overline{z_4(t-1)z_4(t)} \end{bmatrix}$$

Os valores de M_0 e M_1 obtidos foram:

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 & -0,05 & -0,07 & -0,12 \\ -0,05 & 1 & -0,07 & 0,88 \\ -0,07 & -0,07 & 1 & 0,04 \\ -0,12 & 0,88 & 0,04 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad M_1 = \begin{bmatrix} 0,71 & -0,03 & -0,08 & -0,14 \\ -0,03 & 0,77 & -0,06 & 0,66 \\ -0,06 & -0,04 & 0,81 & 0,04 \\ -0,10 & 0,73 & 0,06 & 0,79 \end{bmatrix}$$

Com o resultado de M_0 e M_1 , os valores das matrizes A e B puderam ser calculados.

$$A = \begin{bmatrix} 0,69 & 0,24 & 0 & -0,27 \\ 0,01 & 0,84 & 0,01 & -0,08 \\ 0 & 0,03 & 0,82 & -0,01 \\ -0,01 & 0,15 & 0,04 & 0,66 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B = \begin{bmatrix} 0,69 & 0 & 0 & 0 \\ -0,05 & 1,01 & 0 & 0 \\ -0,01 & 0 & 0,58 & 0 \\ -0,02 & 0,97 & -0,03 & -0,57 \end{bmatrix}$$

Passo 3: Obtenção do vetor de ruídos brancos $\epsilon(t)$ para os 4 postos considerados.

Ruído branco é um processo estocástico constituído de uma sequência de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas, com média igual a zero e desvio padrão igual a 1.

A geração do vetor de ruídos brancos foi obtida diretamente no programa EXCEL, através da ferramenta de análise de dados, que permite a geração de números aleatórios.

Passo 4: Geração das séries.

As séries foram geradas com o dobro do comprimento desejado, pela aplicação repetida da Eq. (1). Desprezou-se a primeira metade da série gerada.

Passo 5: Transformação das séries geradas (que são dessazonalizadas) em séries não-estacionárias, com variações sazonais. O processo se dá, fazendo o inverso da padronização, ou seja, multiplicando-se os valores de vazão gerados pelo desvio padrão e, a esse produto adiciona-se a média.

As séries geradas para os postos fluviométricos, Fazenda Velha e Buriti, são comparadas com as séries históricas, nas figuras 36 e 37.

FIGURA 36 – Comparação das séries para o Posto Fazenda Velha.

FIGURA 37 – Comparação das séries para o Posto Buriti.

Na tabela 21, são mostradas as séries de vazões dos postos fluviométricos, Fazenda Velha e Buriti, que são utilizadas na simulação do sistema hídrico em estudo, como dados de entrada¹⁶ para o modelo de simulação IRAS.

¹⁶ Essas séries históricas são utilizadas, como dados de entrada no modelo IRAS, na forma do arquivo Sapucaí.FLW (Anexo C).

TABELA 21 – Séries de vazões geradas

Séries geradas através do Modelo Multivariado Autoregressivo (m ³ /s)			
Ano	Mês	Posto Fazenda Velha	Posto Buriti
1982	Jan.	82,82	3,34
	Fev.	97,54	2,80
	Mar.	95,12	3,93
	Abr.	88,55	0,53
	Maio	69,43	1,08
	Jun.	39,49	0,66
	Jul.	41,12	0,68
	Ago.	28,73	0,31
	Set.	22,45	0,68
	Out.	34,73	0,24
	Nov.	51,81	0,63
	Dez.	54,47	0,51
1983	Jan.	122,65	1,93
	Fev.	105,20	4,16
	Mar.	89,14	4,19
	Abr.	74,72	2,59
	Maio	57,38	0,39
	Jun.	49,40	1,58
	Jul.	39,48	0,88
	Ago.	30,54	1,02
	Set.	30,79	0,49
	Out.	43,27	1,54
	Nov.	53,91	1,90
	Dez.	80,40	2,06
1984	Jan.	147,09	2,49
	Fev.	68,86	3,36
	Mar.	115,54	2,21
	Abr.	75,60	1,87
	Maio	64,25	1,12
	Jun.	57,35	1,38
	Jul.	38,35	1,15
	Ago.	35,47	0,19
	Set.	25,47	0,52
	Out.	24,82	0,00
	Nov.	48,12	1,42
	Dez.	44,13	1,37
1985	Jan.	129,95	3,32
	Fev.	122,30	4,27
	Mar.	145,03	1,80
	Abr.	84,36	1,91
	Maio	76,55	1,41
	Jun.	55,26	1,03
	Jul.	33,85	0,59
	Ago.	33,78	0,81
	Set.	30,78	0,60
	Out.	33,67	1,14
	Nov.	51,77	1,77
	Dez.	55,51	1,22

Séries geradas através do Modelo Multivariado Autoregressivo (m ³ /s)			
Ano	Mês	Posto Fazenda Velha	Posto Buriti
1986	Jan.	108,55	2,78
	Fev.	103,48	2,87
	Mar.	91,19	3,30
	Abr.	54,23	2,01
	Maio	55,67	1,86
	Jun.	52,74	0,84
	Jul.	43,66	0,56
	Ago.	38,23	0,41
	Set.	28,93	0,16
	Out.	39,73	0,84
	Nov.	59,30	1,35
	Dez.	86,52	2,20
1987	Jan.	94,85	3,66
	Fev.	121,89	1,99
	Mar.	104,62	3,27
	Abr.	77,07	2,59
	Maio	53,04	0,99
	Jun.	53,17	0,16
	Jul.	41,79	0,73
	Ago.	30,26	0,40
	Set.	31,53	0,15
	Out.	39,51	1,21
	Nov.	50,43	1,08
	Dez.	49,03	0,87
1988	Jan.	74,15	1,13
	Fev.	78,82	4,06
	Mar.	133,92	3,52
	Abr.	85,81	2,75
	Maio	41,58	0,82
	Jun.	51,77	1,02
	Jul.	39,62	0,82
	Ago.	32,42	0,74
	Set.	28,32	0,17
	Out.	39,18	0,86
	Nov.	48,67	2,02
	Dez.	74,11	1,34
1989	Jan.	122,38	3,31
	Fev.	116,85	3,73
	Mar.	71,61	2,86
	Abr.	80,27	2,05
	Maio	50,24	1,53
	Jun.	50,53	1,11
	Jul.	36,42	1,20
	Ago.	31,76	1,06
	Set.	32,79	0,32
	Out.	39,94	0,15
	Nov.	24,46	0,26
	Dez.	60,69	2,29
1990	Jan.	120,31	2,48
	Fev.	73,67	2,52

Séries geradas através do Modelo Multivariado Autoregressivo (m ³ /s)			
Ano	Mês	Posto Fazenda Velha	Posto Buriti
1990	Mar.	107,41	1,66
	Abr.	67,91	2,22
	Maio	48,69	1,47
	Jun.	47,00	0,94
	Jul.	42,49	0,27
	Ago.	27,98	0,70
	Set.	34,41	0,89
	Out.	30,20	1,94
	Nov.	54,79	1,56
	Dez.	68,19	2,08
1991	Jan.	64,22	2,08
	Fev.	96,02	2,49
	Mar.	129,40	4,25
	Abr.	78,29	3,44
	Maio	68,78	0,72
	Jun.	57,93	1,44
	Jul.	39,64	1,23
	Ago.	31,81	0,95
	Set.	28,65	0,34
	Out.	34,22	1,16
	Nov.	45,95	0,95
	Dez.	46,62	1,61
1992	Jan.	55,04	1,84
	Fev.	65,22	2,78
	Mar.	121,85	3,02
	Abr.	74,18	1,87
	Maio	61,05	1,34
	Jun.	42,06	1,06
	Jul.	46,54	1,20
	Ago.	31,96	0,61
	Set.	28,92	0,00
	Out.	36,29	0,38
	Nov.	33,13	0,67
	Dez.	79,10	1,47
1993	Jan.	42,60	3,70
	Fev.	71,55	1,49
	Mar.	99,57	3,21
	Abr.	113,40	1,72
	Maio	60,74	1,34
	Jun.	51,47	0,41
	Jul.	46,40	0,82
	Ago.	33,33	0,90
	Set.	32,90	0,48
	Out.	41,02	1,05
	Nov.	39,63	0,80
	Dez.	69,58	1,01
1994	Jan.	161,76	1,89
	Fev.	124,38	2,17
	Mar.	92,85	3,16
	Abr.	86,81	1,88

Séries geradas através do Modelo Multivariado Autoregressivo (m ³ /s)			
Ano	Mês	Posto Fazenda Velha	Posto Buriti
1994	Maio	53,93	1,05
	Jun.	43,72	1,37
	Jul.	43,10	0,49
	Ago.	31,72	0,51
	Set.	29,31	0,17
	Out.	37,28	0,75
	Nov.	40,10	2,05
	Dez.	60,58	1,15
1995	Jan.	113,74	1,01
	Fev.	77,27	4,16
	Mar.	96,65	1,51
	Abr.	93,57	3,11
	Maio	44,86	1,71
	Jun.	49,97	1,12
	Jul.	43,89	0,91
	Ago.	34,67	1,14
	Set.	25,27	1,06
	Out.	28,39	0,50
	Nov.	50,61	1,04
	Dez.	67,18	0,26
1996	Jan.	75,28	4,59
	Fev.	138,66	3,18
	Mar.	73,58	3,12
	Abr.	80,46	1,50
	Maio	66,70	1,77
	Jun.	44,84	1,38
	Jul.	42,93	0,82
	Ago.	33,89	0,85
	Set.	36,21	0,77
	Out.	33,76	0,67
	Nov.	47,28	1,50
	Dez.	77,27	1,90
1997	Jan.	107,69	3,50
	Fev.	104,80	4,70
	Mar.	117,02	4,47
	Abr.	68,49	1,37
	Maio	71,97	1,89
	Jun.	52,03	0,98
	Jul.	41,29	0,68
	Ago.	32,56	0,50
	Set.	37,11	0,33
	Out.	40,38	0,00
	Nov.	50,72	2,14
	Dez.	70,90	1,62
1998	Jan.	67,98	1,50
	Fev.	176,46	2,86
	Mar.	132,12	4,51
	Abr.	44,59	2,10
	Maio	78,37	2,57
	Jun.	58,48	0,85

Séries geradas através do Modelo Multivariado Autoregressivo (m ³ /s)			
Ano	Mês	Posto Fazenda Velha	Posto Buriti
1998	Jul.	41,93	0,36
	Ago.	35,67	0,61
	Set.	27,15	0,44
	Out.	35,27	0,47
	Nov.	45,78	1,37
	Dez.	76,51	1,64
1999	Jan.	131,36	2,94
	Fev.	119,96	3,42
	Mar.	53,26	2,46
	Abr.	78,03	1,50
	Mai	55,67	1,31
	Jun.	65,85	0,54
	Jul.	36,36	0,33
	Ago.	28,02	0,85
	Set.	30,60	0,74
	Out.	27,39	1,10
	Nov.	40,01	0,96
	Dez.	71,34	1,89

ANEXO C: Arquivo de fluxo (Sapucaí.flw), utilizado no modelo IRAS.

O arquivo de fluxo, utilizado no modelo IRAS como dado de entrada, é composto de sequências de vazões médias para cada etapa de tempo de simulação em cada um dos anos a serem simulados. A forma desse arquivo de fluxo deve ser como descrito a seguir.

A primeira linha deve começar com a palavra **FLOWFILE** seguida pela constante de conversão de armazenamento, que para esse estudo foi considerada 0,33333 (1/30), que transforma as unidades dos dados de entrada que estão em ($\text{hm}^3/\text{mês}$) em (hm^3/dia). Qualquer linha de comentários pode ser adicionada, basta começar a linha com um acento de exclamação.

A segunda linha deve conter cinco números inteiros, separados por espaços. O primeiro refere-se ao ano que começa o registro de dados, neste estudo de caso, o ano de 1982. O segundo inteiro é o número de anos dos dados contidos na sequência hidrológica no arquivo (neste trabalho, 18 anos). O terceiro número é o número de etapas de tempo de simulação, que neste estudo foi considerado 12 etapas de tempo (12 meses). O quarto inteiro representa o número total de sequências hidrológicas (1 para o caso em estudo). O quinto e último inteiro é o número de postos fluviométricos usados no estudo (dois postos foram utilizados: Fazenda Velha e Buriti).

As linhas seguintes devem conter o nome do posto fluviométrico, seguido da constante de conversão de fluxo, considerada 1.0, neste estudo.

Após essas linhas, seguem os registros das vazões, com o primeiro número da linha identificando o ano, seguido da etapa de tempo de simulação, do número da réplica e das vazões dos postos considerados.

FLOWFILE .033333

! Este arquivo contém os dados de afluências no Rio Sapucaí [hm³/mês]

1982 18 12 1 2

Sapucaí 1 ! Corresponde aos dados do posto fluviométrico - Fazenda Velha

Buriti 1 ! Corresponde aos dados do posto fluviométrico - Buriti

1982	1	1	217,64	8,79
1982	2	1	256,34	7,36
1982	3	1	249,98	10,33
1982	4	1	232,71	1,38
1982	5	1	182,45	2,84
1982	6	1	103,78	1,73
1982	7	1	108,05	1,79
1982	8	1	75,50	0,81
1982	9	1	58,99	1,78
1982	10	1	91,26	0,63
1982	11	1	136,17	1,65
1982	12	1	143,14	1,34
1983	1	1	322,33	5,07
1983	2	1	276,46	10,93
1983	3	1	234,27	11,02
1983	4	1	196,35	6,81
1983	5	1	150,79	1,01
1983	6	1	129,82	4,14
1983	7	1	103,75	2,32
1983	8	1	80,25	2,67
1983	9	1	80,90	1,30
1983	10	1	113,72	4,04
1983	11	1	141,69	5,00
1983	12	1	211,29	5,43
1984	1	1	386,55	6,54
1984	2	1	180,97	8,83
1984	3	1	303,63	5,82
1984	4	1	198,67	4,90
1984	5	1	168,86	2,95
1984	6	1	150,73	3,64
1984	7	1	100,79	3,01
1984	8	1	93,21	0,51
1984	9	1	66,94	1,36
1984	10	1	65,22	0,00
1984	11	1	126,45	3,74
1984	12	1	115,97	3,59
1985	1	1	341,51	8,73
1985	2	1	321,41	11,22
1985	3	1	381,13	4,74
1985	4	1	221,69	5,03
1985	5	1	201,17	3,70
1985	6	1	145,22	2,70
1985	7	1	88,97	1,56
1985	8	1	88,76	2,14
1985	9	1	80,89	1,58
1985	10	1	88,48	3,01

1985	11	1	136,05	4,65
1985	12	1	145,88	3,21
1986	1	1	285,28	7,30
1986	2	1	271,95	7,54
1986	3	1	239,66	8,66
1986	4	1	142,51	5,29
1986	5	1	146,31	4,89
1986	6	1	138,60	2,21
1986	7	1	114,75	1,46
1986	8	1	100,46	1,09
1986	9	1	76,04	0,43
1986	10	1	104,41	2,21
1986	11	1	155,85	3,54
1986	12	1	227,37	5,79
1987	1	1	249,27	9,62
1987	2	1	320,33	5,23
1987	3	1	274,95	8,60
1987	4	1	202,53	6,81
1987	5	1	139,39	2,60
1987	6	1	139,73	0,41
1987	7	1	109,83	1,91
1987	8	1	79,53	1,04
1987	9	1	82,86	0,39
1987	10	1	103,84	3,17
1987	11	1	132,53	2,83
1987	12	1	128,86	2,28
1988	1	1	194,87	2,96
1988	2	1	207,14	10,68
1988	3	1	351,95	9,26
1988	4	1	225,52	7,24
1988	5	1	109,28	2,15
1988	6	1	136,05	2,67
1988	7	1	104,13	2,15
1988	8	1	85,20	1,95
1988	9	1	74,42	0,45
1988	10	1	102,96	2,27
1988	11	1	127,90	5,30
1988	12	1	194,77	3,53
1989	1	1	321,61	8,71
1989	2	1	307,08	9,80
1989	3	1	188,19	7,51
1989	4	1	210,94	5,38
1989	5	1	132,04	4,03
1989	6	1	132,78	2,92
1989	7	1	95,70	3,14
1989	8	1	83,47	2,78
1989	9	1	86,17	0,83
1989	10	1	104,97	0,39
1989	11	1	64,28	0,68
1989	12	1	159,50	6,01
1990	1	1	316,16	6,52
1990	2	1	193,61	6,63
1990	3	1	282,28	4,36

1990	4	1	178,47	5,82
1990	5	1	127,95	3,85
1990	6	1	123,51	2,48
1990	7	1	111,66	0,71
1990	8	1	73,52	1,85
1990	9	1	90,44	2,34
1990	10	1	79,37	5,09
1990	11	1	143,98	4,09
1990	12	1	179,20	5,46
1991	1	1	168,78	5,47
1991	2	1	252,35	6,55
1991	3	1	340,06	11,18
1991	4	1	205,74	9,05
1991	5	1	180,75	1,90
1991	6	1	152,23	3,79
1991	7	1	104,18	3,23
1991	8	1	83,59	2,50
1991	9	1	75,30	0,89
1991	10	1	89,94	3,06
1991	11	1	120,75	2,50
1991	12	1	122,51	4,24
1992	1	1	144,63	4,84
1992	2	1	171,39	7,30
1992	3	1	320,23	7,94
1992	4	1	194,95	4,93
1992	5	1	160,44	3,53
1992	6	1	110,52	2,77
1992	7	1	122,30	3,16
1992	8	1	83,99	1,59
1992	9	1	76,01	0,00
1992	10	1	95,37	1,01
1992	11	1	87,05	1,76
1992	12	1	207,87	3,86
1993	1	1	111,96	9,72
1993	2	1	188,04	3,92
1993	3	1	261,68	8,44
1993	4	1	298,01	4,52
1993	5	1	159,64	3,52
1993	6	1	135,27	1,07
1993	7	1	121,94	2,16
1993	8	1	87,60	2,36
1993	9	1	86,46	1,25
1993	10	1	107,80	2,75
1993	11	1	104,15	2,11
1993	12	1	182,85	2,64
1994	1	1	425,11	4,96
1994	2	1	326,87	5,70
1994	3	1	244,01	8,31
1994	4	1	228,13	4,93
1994	5	1	141,73	2,75
1994	6	1	114,89	3,61
1994	7	1	113,27	1,29
1994	8	1	83,36	1,35

1994	9	1	77,02	0,46
1994	10	1	97,97	1,98
1994	11	1	105,39	5,38
1994	12	1	159,20	3,01
1995	1	1	298,90	2,67
1995	2	1	203,07	10,93
1995	3	1	253,99	3,97
1995	4	1	245,90	8,19
1995	5	1	117,89	4,50
1995	6	1	131,32	2,95
1995	7	1	115,34	2,38
1995	8	1	91,10	2,99
1995	9	1	66,40	2,79
1995	10	1	74,61	1,30
1995	11	1	132,99	2,75
1995	12	1	176,54	0,68
1996	1	1	197,84	12,08
1996	2	1	364,39	8,35
1996	3	1	193,36	8,20
1996	4	1	211,45	3,95
1996	5	1	175,30	4,66
1996	6	1	117,83	3,62
1996	7	1	112,83	2,16
1996	8	1	89,05	2,24
1996	9	1	95,16	2,02
1996	10	1	88,73	1,75
1996	11	1	124,26	3,93
1996	12	1	203,07	5,00
1997	1	1	283,00	9,19
1997	2	1	275,43	12,34
1997	3	1	307,54	11,74
1997	4	1	179,99	3,59
1997	5	1	189,14	4,97
1997	6	1	136,73	2,57
1997	7	1	108,51	1,79
1997	8	1	85,56	1,31
1997	9	1	97,53	0,87
1997	10	1	106,11	0,00
1997	11	1	133,29	5,62
1997	12	1	186,32	4,26
1998	1	1	178,64	3,95
1998	2	1	463,73	7,50
1998	3	1	347,21	11,84
1998	4	1	117,19	5,52
1998	5	1	205,97	6,74
1998	6	1	153,70	2,22
1998	7	1	110,20	0,95
1998	8	1	93,73	1,60
1998	9	1	71,35	1,17
1998	10	1	92,68	1,23
1998	11	1	120,31	3,60
1998	12	1	201,06	4,32
1999	1	1	345,21	7,72

1999	2	1	315,25	8,98
1999	3	1	139,98	6,46
1999	4	1	205,06	3,94
1999	5	1	146,29	3,45
1999	6	1	173,06	1,43
1999	7	1	95,56	0,87
1999	8	1	73,65	2,24
1999	9	1	80,41	1,94
1999	10	1	71,99	2,88
1999	11	1	105,14	2,52
1999	12	1	187,48	4,97

ANEXO D: Valores limites iniciais utilizado no modelo IRAS.

TABELA 22 – Valores iniciais utilizados no IRAS

		Valores iniciais			
	Variável	etapa de tempo	1 a 12		
		baixo (low)	alto (high)	baixo (low)	alto (high)
Dourados	Armazen.	0,01	0,035	-	-
São Joaquim	Armazen.	1,00	2,00	-	-
Palmeiras	Armazen.	12,38	16,50	-	-
Anhanguera	Armazen.	9,00	12,00	-	-
Retiro	Armazen.	12,34	16,46	-	-
		etapa de tempo	4 a 9	-	-
Irrigação	Afluência (H1)	11,83	15,77	-	-
		etapa de tempo	4, 5 e 9	etapa de tempo	6 a 8
	Afluência (H2)	5,92	7,89	17,24	23,65
		etapa de tempo	6 a 8		
		Afluência (H3)	23,65	31,54	
		etapa de tempo	1 a 12		
Urb. e Ind. (1)	Afluência	0,35	0,47		
Urb. e Ind. (2)	Afluência	0,45	0,60		
Geração em Dourados	Fluxo	68,32	105,12		
	Geração	4031	5375		
Geração em São Joaquim	Fluxo	66,96	103,02		
	Geração	3000	4000		
Geração em Palmeiras	Fluxo	67,25	103,41		
	Geração	5100	6800		
Geração em Anhanguera	Fluxo	70,66	106,89		
	Geração	6937,5	9250		
Geração em Retiro	Fluxo	72,32	108,11		
	Geração	5400	7200		