

MATHEUS DE OLIVEIRA MAZZA

**PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO DE
RECURSOS HÍDRICOS APLICADOS NA USINA
HIDRELÉTRICA DE BARRA BONITA – SP**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo**

**Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
Sistemas de Energia e Automação**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

São Carlos

2009

“Nem sempre a fraqueza que se sente quer dizer que a gente não é forte.”

Gabriel, o Pensador

A vocês, que me deram a vida e me ensinaram a vivê-la com dignidade, não bastaria um obrigado. A vocês, que iluminaram os caminhos obscuros com afeto e dedicação para que trilha-se sem medo e cheio de esperança. Que sorriram com minhas vitórias e choraram com minhas derrotas. Hoje, comemorem comigo a nossa maior conquista.

Obrigado mãe. Obrigado pai.

Matheus de Oliveira Mazza

Dedico esse trabalho a Néilson Luís Mazza e Meire de Oliveira Mazza, exemplo máximo de respeito, admiração, força, integridade, esperança e amor. Aos meus irmãos Victor de Oliveira Mazza e Túlio de Oliveira Mazza, eternos amigos e companheiros em todas as situações. E à Bianca Chierigato Maníglia, a quem devo minha felicidade.

Amo muito vocês.

Matheus de Oliveira Mazza

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor e amigo Dr. Frederico Fábio Maudad, por sua orientação, apoio, ajuda, confiança e todo esforço colocado nesse trabalho de conclusão de curso.

Aos meus pais e irmãos, que sempre apostaram em mim, pelo suporte, pelo apoio, pelas orações e principalmente pelo amor, que faz a vida valer a pena e possuir um enorme significado. E também aos parentes próximos, todos estiveram presentes na longa caminhada desta graduação. Meu obrigado e meu carinho a todos.

Aos professores que passaram por minha vida, que foram muitos, quero agradecer especialmente a Professora Izilda, que ensinou uma língua estrangeira e despertou em mim um contato inicial maravilhoso com outro idioma. Aos Professores Ricardo Quadros Machado, Dennis Brandão, Diógenes Pereira Gonzaga e Maria Stela Veludo de Paiva, por terem exercido com respeito e admiração incomparáveis o papel maravilhoso de educadores.

Aos eternos e verdadeiros amigos que ganhei no decorrer deste período e principalmente aos meus amigos da República Cafundó com os quais compartilhei vários momentos de alegria e tristeza. Aos professores e funcionários do departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Sem vocês seria impossível, obrigado!

À química Bianca Chierigato Maníglia, pessoa maravilhosa, que ilumina e torna o meu caminho muito mais bonito e repleto de felicidade, e com quem desejo dividir todos os dias de minha vida.

À Dra. Liliane Lazzari Albertin pela ajuda e explicações para a realização deste trabalho e a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS.....	II
RESUMO.....	III
ABSTRACT.....	IV
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3. REVISÃO DA LITERATURA	4
4. LOCAL DE ESTUDO	7
4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS	7
4.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	8
4.3 DADOS CLIMÁTICOS	11
4.4 DADOS TURÍSTICOS	11
5. METODOLOGIA	12
5.1 MODELOS DE SIMULAÇÃO	12
5.2 CARACTERIZAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL MIKE BASIN 2000	13
5.3 LEVANTAMENTO DAS DEMANDAS E DADOS PARA USOS MÚLTIPLOS	17
5.3.1 CAPTAÇÃO E LANÇAMENTO SUPERFICIAIS	17
5.3.2 BACIA DE DRENAGEM DO RESERVATÓRIO DE BARRA BONITA	18
5.3.3 REGRAS OPERACIONAIS PARA O RESERVATÓRIO DE BARRA BONITA	19
5.3.4 DEMANDA DA ECLUSA	20
5.3.5 SIMULAÇÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE BARRA BONITA.....	21
5.3.6 CURVAS OPERACIONAIS DO RESERVATÓRIO DE BARRA BONITA	21
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	25
6.1 SIMULAÇÃO DO CENÁRIO ATUAL	27
6.2 SIMULAÇÃO DE UM CENÁRIO CRÍTICO DE SECA.....	31
7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO.....	36
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curso e localização do rio Tietê no Estado de São Paulo.....	4
Figura 2 - O Estado de São Paulo e suas bacias hidrográficas, evidenciando as bacias que compõem o sistema do rio Tietê.	5
Figura 3 - Mapa do Estado de São Paulo com a localização do reservatório de Barra Bonita, SP.....	8
Figura 4 - Vazão média anual afluente ao reservatório de Barra Bonita (1931 a 2007).....	10
Figura 5 - Vista lateral da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita.....	11
Figura 6 - Exemplo de rede de fluxo do Mike Basin.	15
Figura 7 - Exemplo do editor de séries históricas TSEdit.	16
Figura 8 - Porcentagem da Captação Superficial para cada uso.....	17
Figura 9 - Porcentagem da Lançamento Superficial para cada uso.	18
Figura 10 - Bacia de drenagem do reservatório de Barra Bonita.....	19
Figura 11 - Relação Cota x Área da represa de Barra Bonita.	22
Figura 12 - Relação Cota x Volume do reservatório de Barra Bonita.	24
Figura 13 - Rede de fluxo do sistema de recursos hídricos do reservatório de Barra Bonita.	26
Figura 14 - Vazão mensal afluente ao reservatório de Barra Bonita de 1998 a 2007.....	28
Figura 15 - Análise da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita vista no TSEdit para um cenário atual.....	29
Figura 16 - Nível de satisfação para geração de energia elétrica para um cenário atual.....	30
Figura 17 - Vazão mensal afluente ao reservatório de Barra Bonita nos 10 anos mais secos entre 1931 a 2007.....	31
Figura 18 - Análise da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita vista no TSEdit para um cenário crítico de seca.....	33
Figura 19 - Nível de satisfação para geração de energia elétrica para um cenário crítico de seca.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do reservatório de Barra Bonita - SP.	9
Tabela 2 - Vazões captadas para diversos usos da bacia do reservatório de Barra Bonita.	17
Tabela 3 - Vazões de lançamento para diversos usos da bacia do reservatório de Barra Bonita.	18
Tabela 4 - Regras operacionais para o reservatório da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita.	19
Tabela 5 - Características da Eclusa de Barra Bonita.	20
Tabela 6 - Área observada para cada cota do reservatório de Barra Bonita.	22
Tabela 7 - Volume observado para cada cota do reservatório de Barra Bonita.	23

RESUMO

Neste trabalho foram pesquisados e analisados os dados de demandas para diversos usos da água e os conflitos para um cenário real atual e para um cenário de seca intensa decorrentes no reservatório da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita (SP). O objetivo principal foi fornecer resultados baseados em critérios técnicos e científicos que possibilitam uma análise direta de usos múltiplos da água do reservatório.

Os usos estudados foram abastecimento urbano e industrial, irrigação, e a demanda para geração de energia elétrica e uma simulação de um período crítico de seca para a área da bacia hidrográfica. Também foi objetivo do presente trabalho, um aprofundamento dos conhecimentos em relação ao *software* utilizado (MIKE BASIN 2000) e verificar sua capacidade na representação e simulação dos sistemas hídricos.

Trata-se de um *software* de simulação quantitativa capaz de integrar técnicas de otimização na avaliação de diversos cenários, possibilitando identificar as disponibilidades hídricas diante das crescentes demandas e das diferentes condições hidrológicas. Os resultados foram apresentados através de tabelas e gráficos que podem auxiliar no processo de planejamento e gestão dos usos dos recursos hídricos para diferentes cenários.

Palavras-Chave: bacia hidrográfica; Barra Bonita; demanda; Mike Basin; reservatório; Usina Hidrelétrica.

ABSTRACT

This project was done to analyze the data about current demands for many uses of water and also for a simulation of an intense drought scene related with Barra Bonita hydroelectric power plant in the state of Sao Paulo. The main objective was to provide results based on technical and scientific criteria that allowed a right analysis of the proper use of water. To make this study, it was needed to know the urban and industrial demands of water, irrigation, and how much are the demands for electric power generation. After the simulation, it was possible to make a study to verify its ability in the representation and simulation of water systems.

The software used in the analysis was the mathematical model MIKE BASIN 2000, a quantitative simulation software that uses optimization techniques in a georeferenced database in the evaluation of many scenarios. It was possible to identify the water availability to meet many uses of water resources against growing demands and the different hydrological conditions, minimizing conflicts on its multiple uses. The results were presented in tables and charts that can be used to help and assist on planning and management of many uses of water resources for different scenarios.

Keywords: watershed; Barra Bonita; demand; Mike Basin; reservoir; hydropower plant.

1. INTRODUÇÃO

A água é indispensável para a manutenção da vida na Terra. Usada para consumo humano, atividades industriais, geração de energia, irrigação e tantos outros fins, é fonte de riquezas e desenvolvimento. No entanto, essa multiplicidade de usos demanda quantidades e qualidades diferentes, o que ocasionalmente pode gerar conflitos.

Devido à utilização nos mais diversificados usos da água e ao crescimento populacional e econômico, seu consumo tem aumentado progressivamente. Para garantir as necessidades das futuras gerações, esse recurso renovável (dotado de valor econômico) deve ser gerenciado de forma a atender as demandas presentes e futuras.

Atualmente prevalece o enfoque do aproveitamento múltiplo das águas, ou seja, sistemas de exploração e controle de recursos hídricos voltados para satisfação das necessidades humanas e das demandas vinculadas às atividades econômicas e sociais. Desta forma torna-se necessário regulamentar a distribuição deste recurso natural para evitar conflitos e assegurar o direito de uso da água a todos os cidadãos.

Uma grande questão na atualidade está relacionada com essa demanda crescente e possíveis soluções para a oferta de água para atender aos mais variados usos. Para isso, é necessário um estudo aprofundado e um planejamento adequado da água para identificar o que pode ser feito para atender de maneira satisfatória todos os usuários existentes: abastecimento público, industrial, agricultura, energia entre outros, uma vez que o recurso disponível não é suficiente para atender às demandas de todos os usuários de um determinado sistema.

Devido à grande demanda e a diminuição da oferta hídrica, o problema de escassez da água deixou de ser um problema da região nordeste e passou a fazer parte também dos grandes centros urbanos. Principalmente nos meses de estiagem, pode-se observar um quadro crítico em relação aos recursos hídricos. Neste sentido, é fundamental avaliar objetivamente a potencialidade do sistema e a sua melhor forma de operação. É nessa função que a análise de sistemas e a pesquisa operacional têm contribuído para o desenvolvimento de metodologias e técnicas que têm sido aplicadas aos modelos de análise de sistemas de reservatórios.

Para tentar solucionar esse problema, vários investimentos são empregados para aprofundar as técnicas e ferramentas capazes de avaliar cenários futuros e auxiliar o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos, devido à sua confiabilidade, realização de cálculos precisos com grande velocidade, praticidade na operação, análise de dados e tomadas de decisões. Desta maneira, vários modelos matemáticos possuem as

técnicas de abranger os principais aspectos de uma bacia hidrográfica e mostrar esses resultados.

Segundo Boccia (2004), o processo de aceleração da industrialização iniciou-se no Brasil a partir da década de 1950 e com isso, houve a necessidade da expansão das formas de geração de energia elétrica. Como se trata de um país afortunado no potencial hidráulico, a opção pelo desenvolvimento no Brasil foi inicialmente a hidroeletricidade, e foi a partir dessa época que se iniciou a construção de usinas de grande porte e seus grandes reservatórios.

O local de estudo foi o reservatório de Barra Bonita, o primeiro de uma série de seis reservatórios construídos em cascata no rio Tietê. A importância do gerenciamento dos recursos hídricos das bacias fica evidenciada pelos múltiplos usos deste rio que é um dos principais rios nacionais devido à sua utilização na geração de energia, navegação, irrigação e demais atividades.

Para garantir o uso da água pelas gerações futuras, um plano de gerenciamento deve ser feito e desta forma é necessário que os reservatórios de acumulação de água para fins múltiplos recebam atenção especial, com programas de simulações e de otimização, tentando assim prever todos os possíveis cenários futuros e prevenir problemas relacionados a eles. Todos os usos e problemas relacionados aos recursos hídricos devem ser controlados e gerenciados por meio de políticas, instrumentos e técnicas de gerenciamento que possibilitam seu uso de maneira sustentável.

Atualmente as ferramentas computacionais são de extrema importância para o setor hídrico, onde existem inúmeras técnicas que podem ser utilizadas para auxiliar na escolha de decisões sobre qual seja a melhor alternativa para as diversas formas de uso da água e que melhor se adapte aos interesses dos usuários, dos gerenciadores e da sociedade em geral.

Para melhor compreensão deste estudo, seus métodos e resultados, este se encontra dividido em capítulos auto-explicativos: o primeiro é composto pela introdução e justificativa para o trabalho a ser realizado. No segundo capítulo apresentam-se os objetivos gerais e específicos deste estudo. O capítulo três descreve a fundamentação teórica que embasou conceitualmente a realização do estudo. O capítulo quatro descreve a área de estudo com suas características e apresenta detalhadamente a metodologia do trabalho. Já no capítulo cinco, são apresentados a metodologia e o *software* utilizado nas análises e todos os dados referentes ao reservatório de Barra Bonita.

Os resultados estão apresentados no capítulo seis, com tabelas e gráficos feitos em uma simulação computacional dos usos múltiplos dos recursos hídricos do reservatório. Finalmente os capítulos sete e oito referem-se respectivamente às conclusões e à listagem de referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Aplicar um modelo computacional que seja capaz de auxiliar a tomada de decisão diante das crescentes demandas hídricas relacionadas ao reservatório da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita, fornecendo resultados baseados em critérios técnicos e científicos que possibilitam uma análise direta de uso da água e avaliar cenários de períodos críticos de seca para a utilização de água principalmente na geração de energia elétrica.

O Trabalho de Conclusão de Curso também tem como objetivo o aprendizado do *software* MIKE BASIN (desenvolvido pelo DHI – *Danish Hydraulic Institute* da Dinamarca) para determinar a sustentabilidade relativa do sistema hídrico para uma situação adversa (seca) que será analisada e testada com o uso desta ferramenta.

A idéia deste índice é que se possa determinar o comportamento do sistema relacionado aos recursos de água necessários para a Usina de Barra Bonita suprir a demanda numa possível ocorrência de períodos hidrológicos críticos.

2.2 Objetivos específicos

Realizar o balanço entre disponibilidade e demanda hídrica para um cenário atual e um cenário extremamente crítico de seca através da utilização do *software* MIKE BASIN 2000 para averiguar o comportamento da geração de energia elétrica da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita para estes cenários.

3. REVISÃO DA LITERATURA

O rio Tietê (em Tupi: caudal, volumoso) é famoso nacionalmente por atravessar de sudeste a noroeste o principal estado do Brasil e sua respectiva capital: São Paulo.

Em Salesópolis, na Serra do Mar, o Tietê inicia seu percurso de 1.136 quilômetros de extensão, a 840 metros de altitude e apesar de estar a apenas 22 quilômetros do Atlântico, as escarpas da Serra do Mar obrigam-no a caminhar no sentido inverso. Parece se recusar a ficar limitado a tão curta extensão e corre no sentido oposto ao mar, rumo ao interior e deságua cerca de 50 quilômetros a jusante da cidade de Pereira Barreto no lago formado pela barragem de Jupia no rio Paraná, município de Itapura (divisa com o Estado de Mato Grosso do Sul), que por fim acabará por levar suas águas ao mar.

O rio Tietê, no seu percurso até sua foz no rio Paraná, é dividido em quatro trechos: Alto Tietê, Médio Tietê Superior, Médio Tietê Inferior e Baixo Tietê e se encontra em uma das regiões mais ricas do hemisfério sul.

No município de São Paulo, é margeado pela via expressa Marginal Tietê, que junto com a Marginal Pinheiros, compõe o principal sistema viário da cidade. Estima-se que 2.000.000 de veículos passem por uma das duas marginais diariamente (CET - Companhia de Engenharia de Tráfego, 2007).

Em sua jornada banha 62 municípios ribeirinhos e seis sub-bacias hidrográficas, em uma das regiões mais ricas do hemisfério sul (REDE DAS ÁGUAS, 2009). Considerado um eixo para a dominação em toda sua complexidade, o Tietê foi de extrema importância no período das conquistas territoriais, realizadas pelos Bandeirantes que desbravaram os sertões, fundando povoados e cidades ao longo de suas margens. Além disso, foi principal responsável pela instalação de comunidades diversas às suas margens, sendo fornecedor de água, alimentos, transporte e, mais recentemente, energia.



Figura 1 - Curso e localização do rio Tietê no Estado de São Paulo.

O potencial hídrico e as condições do relevo paulista possibilitavam a construção de usinas hidrelétricas. O uso dos recursos hídricos para a geração de energia encontra-se em conflito com atividades agrícolas (irrigação) e para abastecimento urbano e industrial.

Na unidade hidrográfica da Bacia do Rio Paraná, a bacia do rio Tietê é composta por seis sub-bacias: Alto Tietê, onde está inserida a Região de São Paulo; Piracicaba PCJ; Sorocaba/Médio Tietê; Tietê/Batalha; Tietê/Jacaré e Baixo Tietê.

A partir da década de 1960, foram construídos seis reservatórios que formam um sistema de cascata e têm como objetivo principal gerar energia elétrica. Esse sistema em cascata é formado pelos reservatórios das Usinas Hidrelétricas de Barra Bonita, Bariri, Ibitinga, Promissão, Nova Avanhandava da AES-Tietê e Três Irmãos da CESP e têm um papel econômico e social importante, por estarem localizados em um pólo agrícola e industrial do país.

As águas desses seis reservatórios não são consideradas de boa qualidade, visto que recebem grandes cargas poluidoras, oriundas da região metropolitana de São Paulo e do rio Piracicaba. Apesar disso, os recursos hídricos são bastante utilizados para abastecimento público, recepção de efluentes domésticos e industriais, irrigação, navegação, lazer e prioritariamente para geração de energia elétrica.



Figura 2 - O Estado de São Paulo e suas bacias hidrográficas, evidenciando as bacias que compõem o sistema do rio Tietê.

Fonte: ALMEIDA, 2007.

Após a Região Metropolitana de São Paulo, onde o Tietê recebe as principais cargas poluentes, a sequência de lagos formados para a geração de energia promove uma gradativa melhora na qualidade das águas, funcionando como uma bacia de decantação (PETRERE JR., 1996). Durante seu trajeto até a foz no Rio Paraná, embora recebam ainda a poluição proveniente dos rios Sorocaba, Capivari, Jundiaí e Piracicaba, as águas do Tietê se recuperam de modo crescente.

Os últimos séculos foram determinantes para o rio Tietê em alguns aspectos. Inicialmente, a crescente necessidade energética, a contenção de cheias e a navegação, motivadas pela aceleração da urbanização da Grande São Paulo, desencadearam a construção de barragens, principiando as permanentes alterações do rio. Necessário para o funcionamento de usinas geradoras de energia elétrica, o rio Tietê experimentou finalmente as consequências do desenvolvimento capitalista industrial tardio brasileiro.

4. LOCAL DE ESTUDO

4.1 Características gerais

Na década de 1880 Barra Bonita recebeu tal denominação, pelo fato de formar uma vista agradável nesse ponto onde o rio Tietê se encontrava com as águas de um córrego.

O engenheiro Catulo Branco liderou os estudos que foram concluídos no início da década de 1950, culminando com a construção da usina hidrelétrica de Barra Bonita entre os anos de 1957 e 1963.

O reservatório de Barra Bonita é o primeiro de uma série de seis reservatórios construídos em cascata no rio Tietê, localizando-se em uma das regiões mais populosas e desenvolvidas do interior do Estado de SP, e se localiza na sub-bacia do Médio Tietê Inferior. A barragem foi construída na década de 60, com funcionamento a partir de 20 de maio de 1963. A sua formação ocorreu a partir do represamento das águas dos rios Tietê e Piracicaba, além de vários outros tributários que drenam suas águas para esses dois rios de maior importância.

Em 15 de maio de 1957, Jânio da Silva Quadros (o então governador de São Paulo) assinou o Decreto nº 28.403 que declarava de utilidade pública as muitas glebas de terras situadas às margens dos rios Tietê, Piracicaba e afluentes, uma área superior a 300 km², necessária à formação do reservatório de regularização de vazões da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita, símbolo de um novo ciclo de desenvolvimento.

A área total de contribuição de afluência ao reservatório é de aproximadamente 19.000 km², sendo que se trata de uma das regiões mais populosas e desenvolvidas do interior do Estado de São Paulo (PRADO, 2004).

Seu reservatório é bastante utilizado para fins de navegação, piscicultura, recreação e turismo. A Eclusa de Barra Bonita está operando desde 1962, é a primeira da Hidrovia Tietê-Paraná e a transposição do desnível entre a vazante do rio Tietê e a bacia de acumulação da hidrelétrica é de 24 metros.

O território abrangido pelo reservatório contém áreas urbanas, vegetação natural, pastagens, reflorestamento, cultura de horta, frutas, milho e cana-de-açúcar, além da extração e processamento de calcário. As indústrias presentes na região são têxteis, alimentícias, químicas, mecânicas, eletroeletrônicas e agroindustriais.

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

Dentre os diversos tributários do sistema, os rios Piracicaba e Tietê são os principais responsáveis pelo estado trófico do reservatório, fornecendo altas cargas de nutriente e metais através dos despejos domésticos e industriais (OISHI, 1996).



Figura 3 - Mapa do Estado de São Paulo com a localização do reservatório de Barra Bonita, SP.

4.2 Características Técnicas

A Usina Hidrelétrica de Barra Bonita (primeira em funcionamento da América do Sul, só não é a primeira da América Latina, devido ao Canal do Panamá), que está localizada no estado de São Paulo, represa as águas do rio Tietê (bacia do rio Paraná).

Este reservatório foi construído para a geração de energia elétrica, porém atualmente é também utilizado para transporte hidroviário, turismo, lazer, pesca e como suporte ao desenvolvimento do complexo industrial da região. Dados característicos da usina e do reservatório de Barra Bonita estão apresentados na Tabela 1 - Características do reservatório de Barra Bonita - SP.

1.

Tabela 1 - Características do reservatório de Barra Bonita - SP.

Localização	Latitude	22°31' 06" S
	Longitude	48°32' 01" W
	Endereço	Rod. Jaú/São Manoel s/n – Barra Bonita (SP)
Barragem	Comprimento	480 m
	Tipo	Concreto
Reservatório	Área do espelho d'água no nível máximo útil	310 km ²
	Cota Máxima Útil	451,50 m
	Cota Mínima Útil	439,50 m
	Volume Útil	2.566 hm ³
	Volume morto	569 hm ³
	Volume total	3.622 hm ³
	Profundidade máxima	30,2 m
	Profundidade média	10,2 m
Vertedouro	Número de Comportas	5
	Altura da queda de água	23,50 m
	Descarga total	4530 m ³ /s
Capacidade Instalada	Número de Turbinas	4
	Turbinas tipo	Kaplan
	Gerador	Umbrella
	Potência total instalada	140,76 MW
Subestação Elevadora	Número de Circuitos	8
	Tensão Nominal	138/69 kV
Eclusa	Capacidade	10 milhões t/ano
	Comprimento	147,25 m
	Largura	11,76 m

Fonte: AES Tietê (www.aestiete.com.br)

A AES Tietê mantém a vazão de restrição de Barra Bonita em 2000 metros cúbicos por segundo (ONS, 2008), para garantir o controle de cheias do Sistema Interligado e para aumentar a segurança no controle de cheias locais.

O setor elétrico tem adotado o termo vazão natural para identificar a vazão que ocorreria em uma seção do rio, se não houvesse as ações antrópicas na sua bacia

contribuinte. Tais como regularizações de vazões realizadas por reservatórios, desvios de água, evaporações em reservatórios e usos consuntivos (irrigação, criação animal e abastecimentos urbano, rural e industrial).

Os dados de vazão natural afluente ao reservatório de Barra Bonita, durante o período de 1931 a 2007, foram obtidos pelas séries de vazões médias mensais divulgadas por ONS (2009) e com esses dados, foi elaborado o gráfico de vazão média anual do reservatório de Barra Bonita, representado na Figura 4.

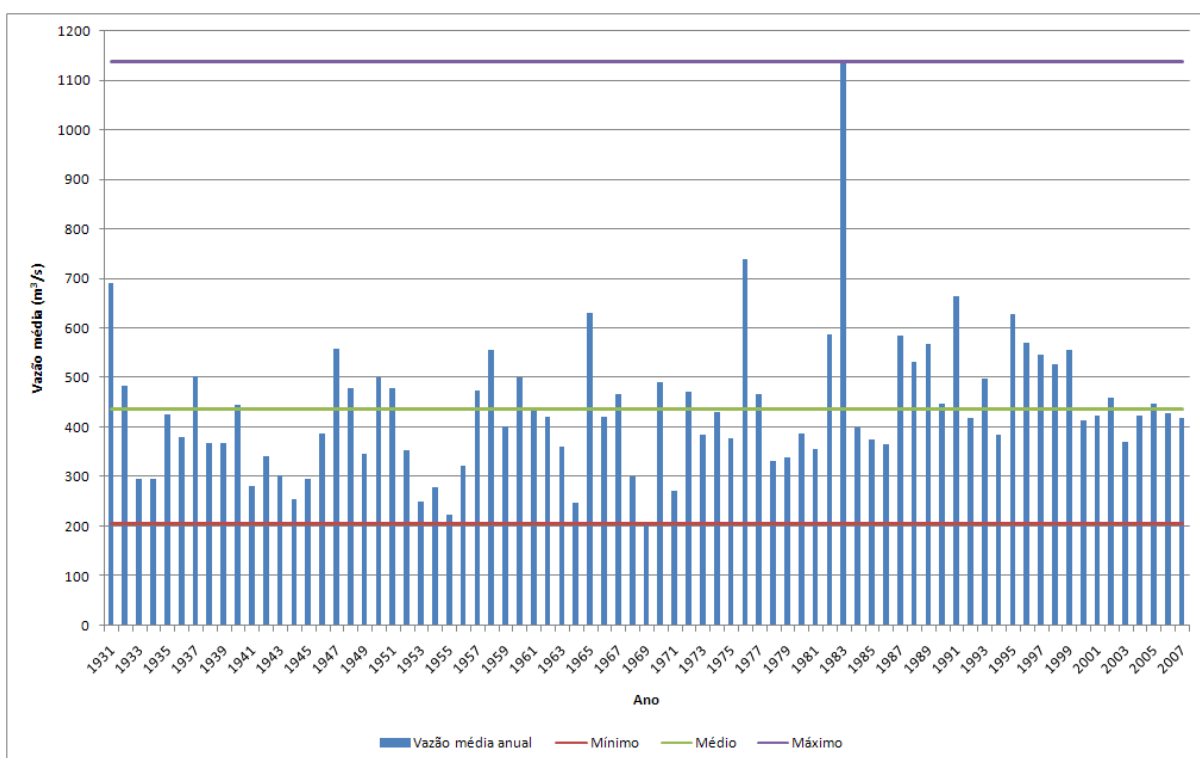


Figura 4 - Vazão média anual afluente ao reservatório de Barra Bonita (1931 a 2007).

Observa-se na Figura 4 que o menor valor de vazão média anual ocorreu no ano de 1969 com 206 m³/s e o maior valor de toda a série histórica ocorreu no ano de 1983 com 1137 m³/s, sendo que a média anual de toda a série histórica foi de 436,5 m³/s. E também que de acordo com os dados publicados pela ONS (2004), o reservatório de Barra Bonita possui uma evaporação líquida anual de 466 mm.

Os usos múltiplos da água da bacia de Barra Bonita são utilizados para abastecimento urbano e industrial, irrigação, geração de energia elétrica, navegação fluvial, turismo e recreação, pesca e vazão ecológica.

Vazão ecológica é a demanda mínima necessária de água para manter um rio em sua forma natural, de forma a assegurar a manutenção e a conservação dos ecossistemas

aquáticos naturais e dos aspectos da paisagem. Recomenda-se que seja garantida uma vazão ecológica de 76 m³/s à jusante do reservatório de Barra Bonita (ONS, 2008).

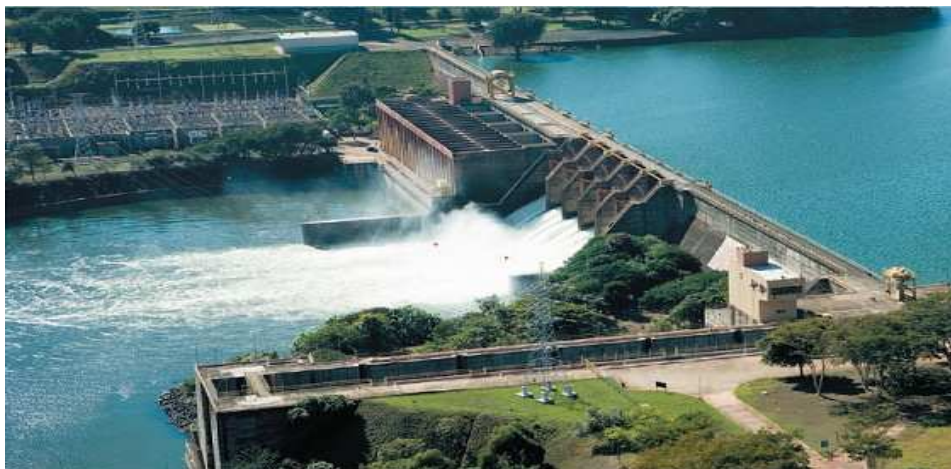


Figura 5 - Vista lateral da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita.

4.3 Dados climáticos

O clima na região é considerado de transição entre os climas tropical e subtropical. Segundo Monteiro (1973), de forma mais específica, a maior parte da área de estudo pode ser classificada quanto aos climas zonais, como climas controlados por massas equatoriais e tropicais. No mês mais quente a temperatura fica acima de 22° C e no mês mais frio a temperatura mínima é inferior a 18° C e de acordo com a classificação de Koppen, o clima na região pode ser considerado como CW (clima tropical mesotérmico úmido, com inverno seco e verão quente).

O inverno é caracterizado por apresentar temperaturas médias diárias que variam de 11° C a 21° C, que geralmente são dias claros e sem nuvens, quando comparado a alguns dias do verão. Já no verão, as temperaturas médias variam de 23° C a 33° C com chuvas abundantes, atingindo valores de até 30 milímetros por dia (mm/dia). Devido às temperaturas e à instabilidade do tempo nesta época do ano, dias nublados e abafados são comuns (CALIJURI, 1999).

4.4 Dados turísticos

O reservatório de Barra Bonita proporciona a atividade turística para as cidades ao seu entorno, sendo que algumas destas cidades têm como atividade principal o turismo que gera desenvolvimento e renda. O turismo que já é muito explorado na região de Barra Bonita pode, ao longo da hidrovia, gerar grandes oportunidades de desenvolvimento sócio-econômico com o aparecimento de áreas de lazer, esporte, recreação e portos turísticos. As grandes superfícies de águas dos reservatórios, a extensão de rios em corrente livre, as

paisagens naturais e os recursos energéticos privilegiarão além do turismo clássico de lazer e cultura, o ecológico e o fluvial (OLIVEIRA, 2004).

5. METODOLOGIA

5.1 Modelos de Simulação

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

A vantagem da simulação computacional é que esta pode ser aplicada a sistemas complexos e aceitar quaisquer equações de restrição. A grande vantagem é oferecer aos usuários a oportunidade de restringir o espaço decisório, e assim a solução de problemas é alcançada através de iterações e processos de tentativa e erros. No entanto, a simulação pode ser associada a técnicas de otimização (AZEVEDO, 2002).

Existem vários modelos de simulação para sistemas hídricos. Um deles é o HEC-5 (HEC, 1976), que foi desenvolvido para fornecer subsídio no dimensionamento e operação de sistemas de reservatórios. Um exemplo de aplicação deste modelo pode ser visto no trabalho de Zahed (1984). Outro modelo de simulação é um desenvolvido por Loucks (1995) chamado *Interactive River Aquifer Simulation* (IRAS), utilizado por Mauad (2000) para análise de problemas de usos múltiplos no Aproveitamento Hidrelétrico de Alqueva em Portugal, considerando que o sistema deveria fornecer água para o consumo urbano e industrial, para a irrigação, geração de energia e para o incremento do abastecimento ao Algarve e ao sul da Espanha.

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

Estas análises incluíram a satisfação, que pode ser definida como a probabilidade de atendimento das demandas totais do sistema. A idéia deste índice é que se possa determinar o volume médio de água necessário para suprir o sistema quando da ocorrência de períodos hidrológicos críticos.

Outro modelo de simulação existente é o que será utilizado neste estudo, o Mike Basin. Dyrbak (2000) realizou um trabalho utilizando esse modelo para determinar a melhor

política operacional de reservatórios na Polônia. O objetivo foi prevenir a ocorrência de cheias, enquanto maximiza a oferta de água para abastecimento urbano e irrigação. Os resultados obtidos demonstraram que o modelo foi eficiente para otimizar a regra operacional dos reservatórios.

Várias outras pesquisas foram feitas utilizando o Mike Basin. Larsen (2000) o utilizou para definir os planos e estratégias operacionais a nível nacional, regional e local para utilização dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Mun no Nordeste da Tailândia. Lima (2002) analisou os conflitos entre os usos múltiplos da água na bacia do rio Atibaia no Estado de São Paulo. Corrêa (2004) abordou a questão do rebaixamento dos níveis da represa Jaguari, onde foram simulados quatro cenários distintos para o problema.

Albertin (2004) também utilizou o Mike Basin para avaliar a disponibilidade hídrica quantitativa e qualitativa da bacia hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim, SP. Ershadi (2005) também usou o *software* para realizar o planejamento integrado dos recursos hídricos da bacia hidrográfica de Cabul, localizado no sudeste do Afeganistão, onde todas as informações sobre disponibilidade e demanda de água foram organizadas e representadas no referido modelo.

5.2 Caracterização do Modelo Computacional Mike Basin 2000

A modelagem computacional do reservatório da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita foi realizada a partir do uso do modelo MIKE BASIN. É um dos modelos que possui tecnologia mais avançada disponível atualmente na questão de análise de recursos hídricos e vem sendo apresentado como uma nova e versátil ferramenta de suporte a decisões no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.

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

Foram definidas a situação atual do reservatório e uma análise para um período crítico de seca intensa da usina para se verificar seu comportamento. Essa simulação é importante para prever a relação entre a demanda e a disponibilidade hídrica na região estudada e principalmente para verificar como o sistema suportará atender suas demandas caso aconteça um período de estiagem.

Para os *softwares* de planejamento para bacias hidrográficas, o Mike Basin se destaca por apresentar o maior número de ferramentas e opções. Os resultados foram obtidos pelas simulações desenvolvidas no modelo e avaliados a partir de índices estatísticos de satisfação, de acordo com a geração de energia elétrica pela Usina Hidrelétrica de Barra Bonita.

Tudo isso visando o gerenciamento dos recursos na atualidade para fazer um planejamento das decisões relacionadas ao sistema de recursos hídricos, garantindo a melhor utilização da água para as próximas gerações.

Os modelos são representações de um sistema real e podem ser físicos, analógicos e/ou matemáticos. O Mike Basin é um desses diversos modelos de planejamento, um pacote de *software* profissional de engenharia desenvolvido pelo Instituto de Hidráulica da Dinamarca (DHI – *Danish Hydraulic Institute*) e seu sistema associa técnicas de simulação e otimização.

A simulação matemática é considerada a técnica mais flexível para a análise de sistemas de recursos hídricos. É amplamente utilizada na gestão e planejamento de recursos hídricos. A simulação permite que a maioria dos sistemas seja representada matematicamente através de modelos computacionais.

O Mike Basin é uma ferramenta usada para ajudar os tomadores de decisão na identificação de um desenvolvimento sustentável, na escassez dos recursos hídricos, usos conflitantes, levando-se em conta as prioridades específicas, características rurais, urbanas e sócio-econômicas.

Segundo Azevedo (1997), e Yeh (1985^a) a simulação é uma técnica de modelagem utilizada para aproximar o comportamento de um sistema real no computador, representando da melhor maneira possível as características desse sistema através do emprego de descrições algébricas ou matemáticas.

O Mike Basin permite representar matematicamente uma bacia hidrográfica, com a configuração dos rios principais e tributários, a hidrologia da bacia no espaço e no tempo e os esquemas de demanda de água. São utilizadas informações de séries de vazões, precipitação, séries meteorológicas, informações sobre demandas, irrigação, dentre outras.

Tecnicamente, trata-se de um modelo de rede de fluxo, no qual os rios e seus principais afluentes são representados por rede de “arcos” e “nós”, exemplificado na Figura 6. Os nós representam locais como nascentes, confluências de rios, postos fluviométricos, ponto de captação, lançamento de águas residuárias, reservatórios, demandas, reversões, confluências e outros pontos importantes de um sistema. Os arcos são as ligações entre os nós e representam trechos de rios, adutoras, canais e outras estruturas. Todas as informações relativas à configuração da rede são editadas na tela do computador. (ALBERTN, 2004).

Segundo Caminiti (2004), os modelos de simulação são ferramentas inestimáveis, para a gestão dos recursos hídricos. Os modelos permitem testar cenários, prever resultados de altos riscos e de altos custos ambientais, além de estabelecer prioridades. Haverá sempre algum grau de incerteza, pois os modelos são simplificações da realidade.

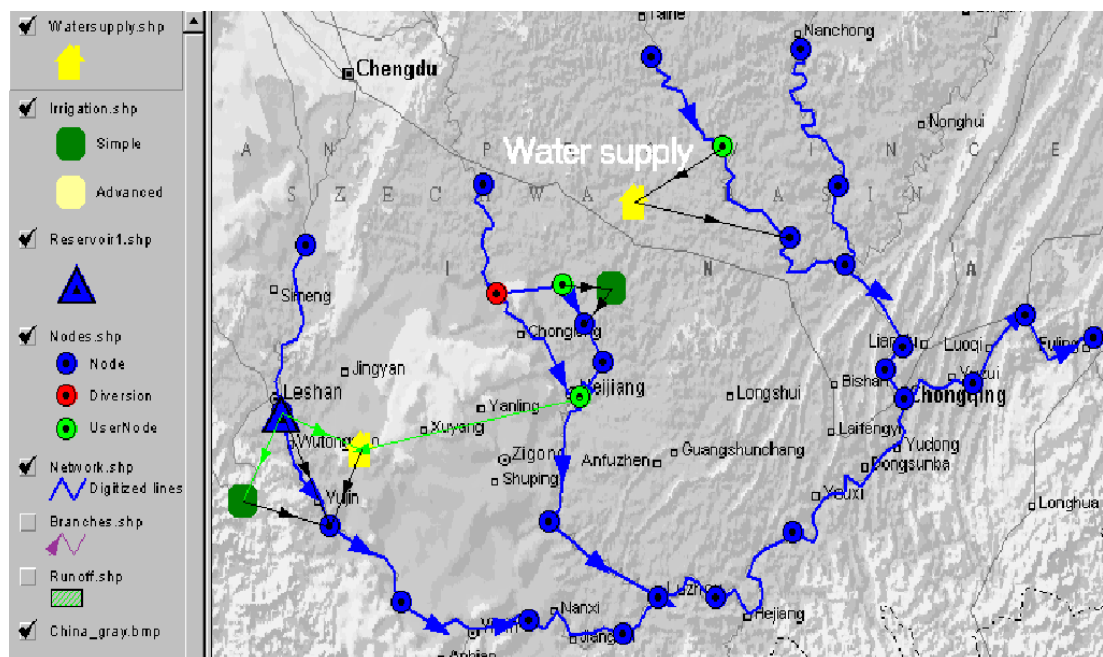


Figura 6 - Exemplo de rede de fluxo do Mike Basin.

Fonte: [HTTP://www.cwr.utexas.edu/gis/gishyd98/dhi/mikebas/Mbasmain.htm](http://www.cwr.utexas.edu/gis/gishyd98/dhi/mikebas/Mbasmain.htm).

O conceito matemático do *software* é baseado nas equações da conservação da massa e energia. O Mike Basin simula o desempenho do sistema global aplicando o balanço de massa em toda a rede de nós e arcos encontrando, iterativamente, soluções estacionárias para cada intervalo de simulação.

De acordo com Lima (2002), a simulação é considerada a técnica mais flexível utilizada em recursos hídricos, permitindo que todas as características de um sistema sejam representadas por uma descrição matemática. O objetivo da simulação é representar e operar um sistema de forma mais detalhada possível, bem como fornecer informações para avaliar seu comportamento real.

Sobre o Mike Basin, entre suas principais características pode-se citar a análise de disponibilidade de água, planejamento de infra-estrutura, avaliação do potencial de irrigação, análise do desempenho de reservatórios e análise da capacidade de abastecimento de água. Também pode ser utilizado para os estudos de ecossistemas como a qualidade da água, exigências de vazões mínimas, desenvolvimento sustentável, efeitos das mudanças globais, definição de prioridades, etc.

Outras características do modelo são seu rápido tempo de processamento, sua flexibilidade e facilidade na representação dos sistemas hídricos e a capacidade de associar

as técnicas de simulação e otimização através de uma rede de fluxo. Devido a estas e outras potencialidades que foram descritas, o modelo foi considerado ideal para a pesquisa.

O Mike Basin usa o *Time Series Editor* (TSEdit) da própria DHI para a entrada de séries de dados. As séries temporais são inseridas na forma de tabelas e os dados podem ser importados para o TSEdit delimitados de arquivos ASCII ou diretamente a partir do Excel usando o padrão Windows da Microsoft para recortar e colar funções. O TSEdit também é utilizado para a apresentação de resultados. A figura 7 apresenta um exemplo de séries históricas no TSEdit.

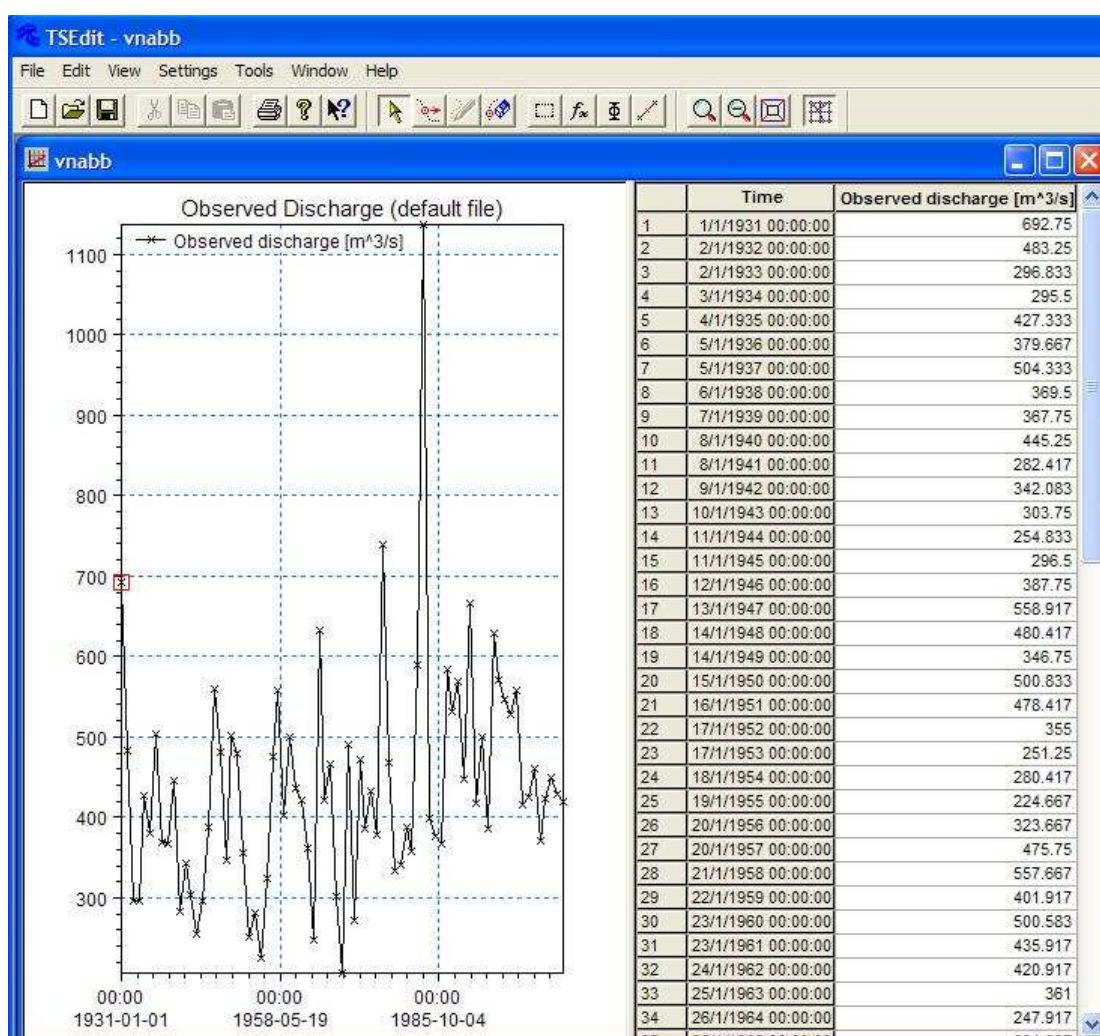


Figura 7 - Exemplo do editor de séries históricas TSEdit.

5.3 Levantamento das demandas e dados para usos múltiplos

5.3.1 Captação e lançamento superficiais

Os dados relativos às demandas e usos dos recursos hídricos foram obtidos por meio de levantamento dos dados do sistema de outorga de DAEE (2009) para a bacia do reservatório de Barra Bonita.

Os valores das vazões de captação superficial e de lançamento superficial estão relacionados, respectivamente, na Tabela 2 e na Tabela 3. Essas informações foram coletadas pelo DAEE (2009) e correspondem aos dados de outorga de direito de uso de recursos hídricos. As classes de uso são definidas como: industrial, urbano, irrigação, uso rural, mineração, lazer, comércio e outros.

Tabela 2 - Vazões captadas para diversos usos da bacia do reservatório de Barra Bonita.

Captação Superficial (m ³ /s)								
Industrial	Urbano	Irrigação	Uso rural	Mineração	Lazer	Comércio	Outros	Total
18,03474	12,75751	3,97017	0,68019	0,55977	0,02621	0,00977	0,00001	36,03835

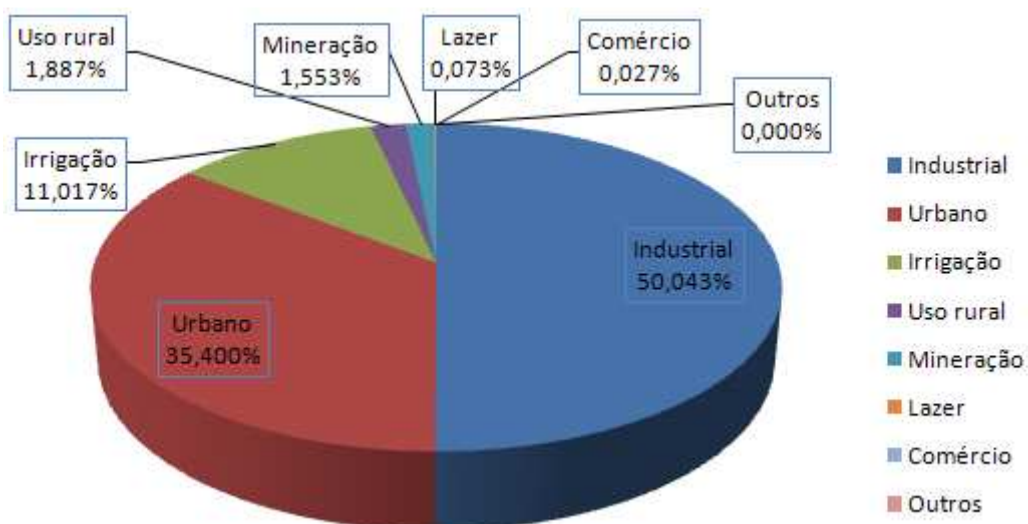


Figura 8 - Porcentagem da Captação Superficial para cada uso.

Tabela 3 - Vazões de lançamento para diversos usos da bacia do reservatório de Barra Bonita.

Lançamento Superficial (m ³ /s)								
Industrial	Urbano	Irrigação	Uso rural	Mineração	Lazer	Comércio	Outros	Total
15,80542	9,86113	0,06293	0,54539	0,38227	0,02628	0,00203	0,00707	26,69251

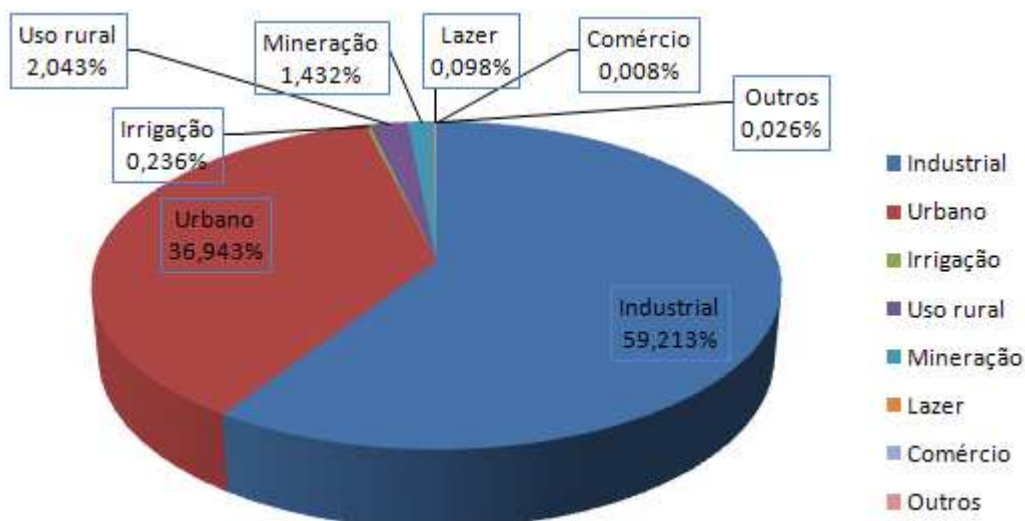


Figura 9 - Porcentagem da Lançamento Superficial para cada uso.

É conhecida a vazão natural afluente ao reservatório de Barra Bonita que foi apresentada na Figura 4, com o valor médio de 436,5 m³/s (ONS, 2009).

A vazão natural afluente ao reservatório de Barra Bonita pode variar devido às captações e lançamentos ocorridos na bacia de drenagem à montante do reservatório. Como descrito na Tabela 2 e na Tabela 3, segundo os dados de outorga, a captação superficial é de 36,038 m³/s e a vazão total de lançamento é de 26,692 m³/s.

5.3.2 Bacia de drenagem do reservatório de Barra Bonita

Uma bacia hidrográfica ou bacia de drenagem de um curso de água é o conjunto de terras que fazem a drenagem da água das precipitações para esse curso de água e seus afluentes. A área de influência da bacia de drenagem do reservatório de Barra Bonita é apresentada na Figura 10, totalizando uma área de 15.436,7 km². O modelo considera que esta área contribui com uma vazão específica, cuja totalidade aflui para o reservatório.

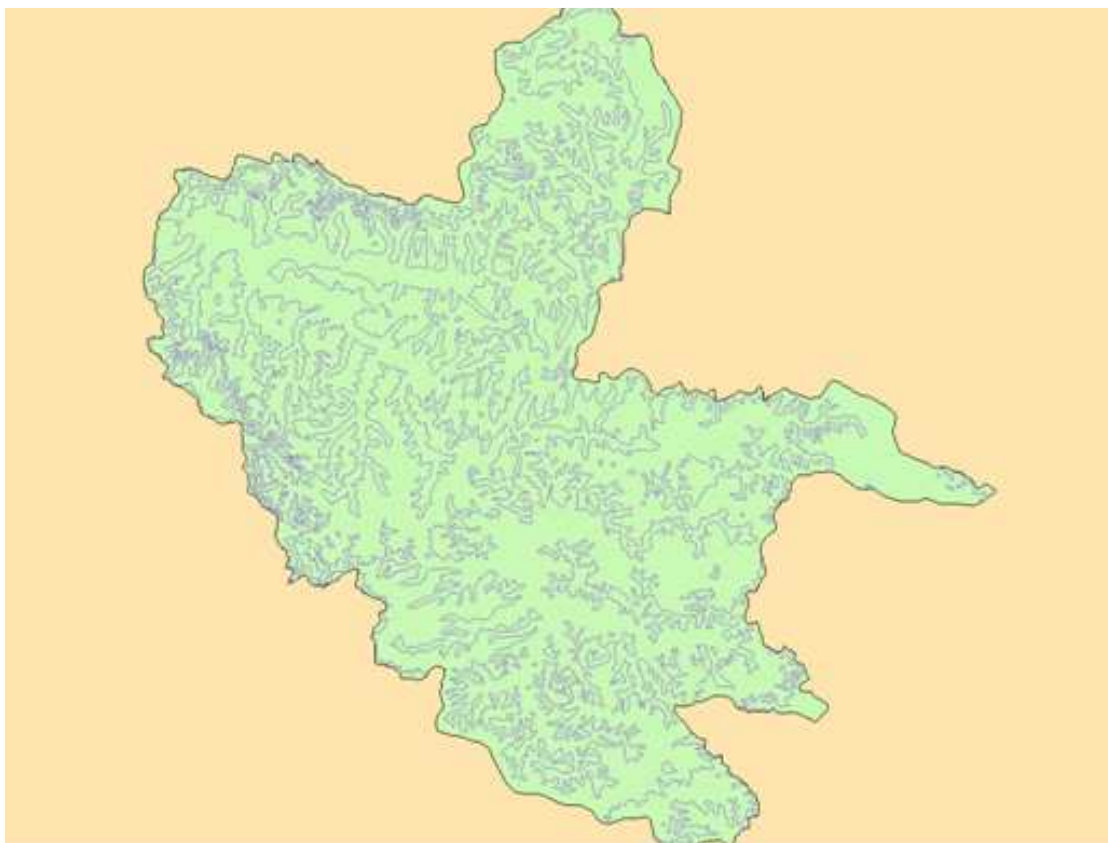


Figura 10 - Bacia de drenagem do reservatório de Barra Bonita.

5.3.3 Regras operacionais para o reservatório de Barra Bonita

Os dados de entrada de operação para o reservatório são as cotas e as regras operacionais que foram obtidos através de FIPAI (2005a), além das restrições operacionais do sistema e são definidas na tabela 4:

Tabela 4 - Regras operacionais para o reservatório da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita.

Cota máxima do reservatório	453 metros
Cota operacional mínima	439,5 metros
Cota para o controle de cheias	451,5 metros
Cota máxima do volume morto	439,5 metros
Cota mínima de fundo	422 metros
Nível operacional mínimo	446,5 metros
Vazão mínima de liberação	76 metros cúbicos por segundo
Vazão máxima de liberação	2.000 metros cúbicos por segundo

Na simulação, o nível operacional mínimo foi considerado o menor para garantir a navegação. A vazão mínima é a vazão residual ou ecológica a ser considerada em um curso de água, necessária à preservação do ambiente. A vazão mínima de liberação é utilizada para o planejamento da bacia hidrográfica, para a avaliação do atendimento aos padrões ambientais e foi utilizada para garantir a sobrevivência e a continuidade ecológica do sistema. Já a vazão máxima de liberação é feita para garantia do controle de cheias.

5.3.4 Demanda da eclusa

Deve ser contabilizado também o consumo de água do reservatório pela eclusa. Com níveis d'água a jusante da barragem acima da cota 429,7 m não há condições de eclusagem (ONS, 2008).

Na Tabela 5 estão relacionados alguns dados característicos da eclusa de Barra Bonita que foram utilizados para determinar a quantidade média de água consumida pela eclusa.

Tabela 5 - Características da Eclusa de Barra Bonita.

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

Fonte: www.adtp.org.br

De acordo com Oliveira (2004), a partir dos dados coletados e das dimensões da eclusa, é possível determinar a quantidade média de água consumida para este fim conforme a equação (1).

$$Q_{Ecl} = \frac{C_{Ecl} \cdot L_{Ecl} \cdot D_{Max} \cdot N_{Mês}}{86.400 \cdot 30} \quad (1)$$

Onde:

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

C_{Ecl} = Comprimento da eclusa (m)

L_{Ecl} = Largura da eclusa (m)

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

$N_{Mês}$ = Número médio de eclusagens realizadas mensalmente

De acordo com Maia (2009), o número médio de eclusagens realizadas mensalmente é de 227. Substituindo todos os valores da Tabela 5, consegue-se achar a vazão média mensal consumida nas eclusagens. Portanto,

$$Q_{\text{Ecl}} = \frac{147,25 \cdot 11,76 \cdot 24 \cdot 227}{86.400 \cdot 30} = 3,64 \text{ m}^3/\text{s} \quad (2)$$

Assim, a quantidade de água necessária para o funcionamento da eclusa é de 3,64 m³/s.

5.3.5 Simulação da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita

Para a simulação da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita, a potência instalada baseia-se na equação onde alguns dados são necessários: o desnível geométrico de queda de água, a eficiência das turbinas, a aceleração da gravidade, a densidade da água e as vazões nas turbinas. A potência gerada é calculada pela seguinte fórmula:

$$P = \Delta H \cdot Q \cdot \delta \cdot g \cdot \rho \quad (3)$$

Em que:

P: Potência gerada (w)

ΔH : Altura de queda (m)

Q: Vazão nas turbinas (m³/s)

δ : eficiência das turbinas (%)

g: constante gravitacional (m/s²)

ρ : densidade da água (kg/m³)

5.3.6 Curvas operacionais do reservatório de Barra Bonita

As curvas operacionais Cota x Área e Cota x Volume do reservatório de Barra Bonita foram obtidas através de FIPAI (2005a), as áreas observadas para cada cota do reservatório está representada pela Tabela 6, com as quais foi possível gerar o gráfico de crescimento da área em relação à cota, representado pela Figura 11.

Tabela 6 - Área observada para cada cota do reservatório de Barra Bonita.

<i>Cota (m)</i>	<i>Área (m²)</i>	<i>Cota (m)</i>	<i>Área (m²)</i>
453	350.634.605,0	437	78.204.386,0
452	305.043.186,0	436	62.578.717,0
451	290.218.523,0	435	45.660.256,0
450	276.374.548,0	434	32.865.041,0
449	263.792.810,0	433	25.395.064,0
448	247.269.502,0	432	13.835.962,0
447	230.315.131,0	431	8.935.212,0
446	215.044.890,0	430	6.963.740,0
445	202.061.191,0	429	5.952.721,0
444	187.499.426,0	428	4.685.685,0
443	171.493.026,0	427	3.650.322,0
442	155.379.388,0	426	2.600.243,0
441	138.712.691,0	425	1.902.814,0
440	123.155.250,0	424	1.153.925,0
439	108.935.823,0	423	492.608,0
438	94.034.535,0	422	140.410,0

Fonte: FIPAI (2005a)

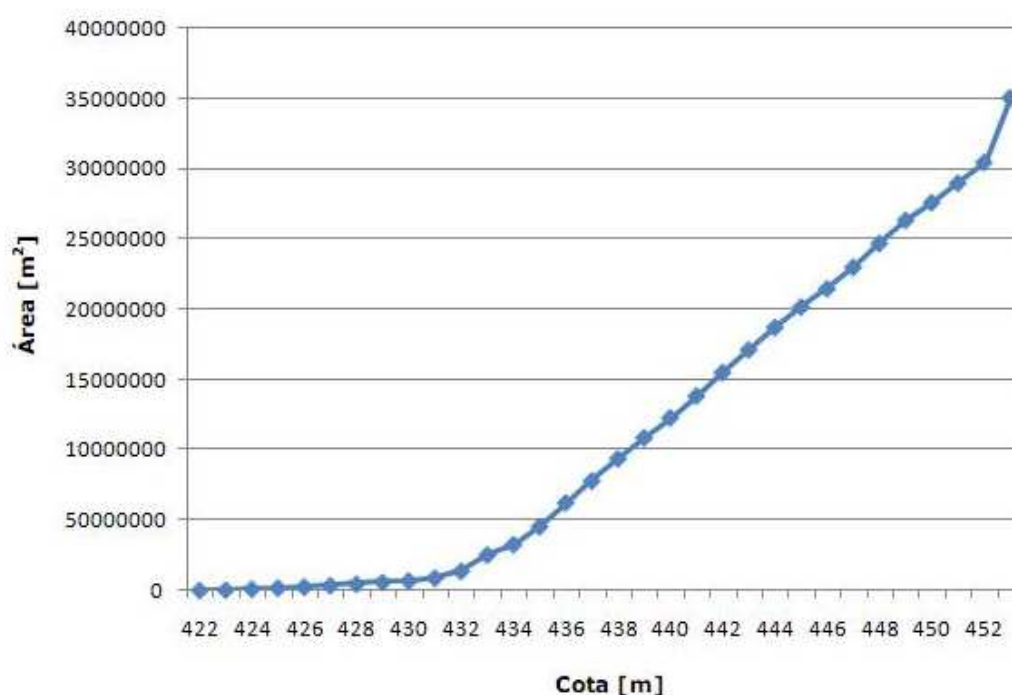


Figura 11 - Relação Cota x Área da represa de Barra Bonita.

O mesmo foi feito para a curva operacional Cota x Volume do reservatório de Barra Bonita. Os dados foram obtidos através de FIPAI (2005a) e representam o volume de água observado para cada cota do reservatório, demonstrado pela Tabela 7. Esses dados foram usados para gerar o gráfico de crescimento do volume em relação à cota, representado pela Figura 12.

Tabela 7 - Volume observado para cada cota do reservatório de Barra Bonita.

<i>Cota (m)</i>	<i>Volume (m³)</i>	<i>Cota (m)</i>	<i>Volume (m³)</i>
453	327.838.895,50	437	70.391.551,50
452	297.630.854,50	436	54.119.486,50
451	283.296.535,50	435	39.262.648,50
450	270.083.679,00	434	29.130.052,50
449	255.531.156,00	433	19.615.513,00
448	238.792.316,50	432	11.385.587,00
447	222.680.010,50	431	7.949.476,00
446	208.553.040,50	430	6.458.230,50
445	194.780.308,50	429	5.319.203,00
444	179.496.226,00	428	4.168.003,50
443	163.436.207,00	427	3.125.282,50
442	147.046.039,50	426	2.251.528,50
441	130.933.970,50	425	1.528.369,50
440	116.045.536,50	424	823.266,50
439	101.485.179,00	423	316.509,00
438	86.119.460,50	422	70.205,00

Fonte: FIPAI (2005a)

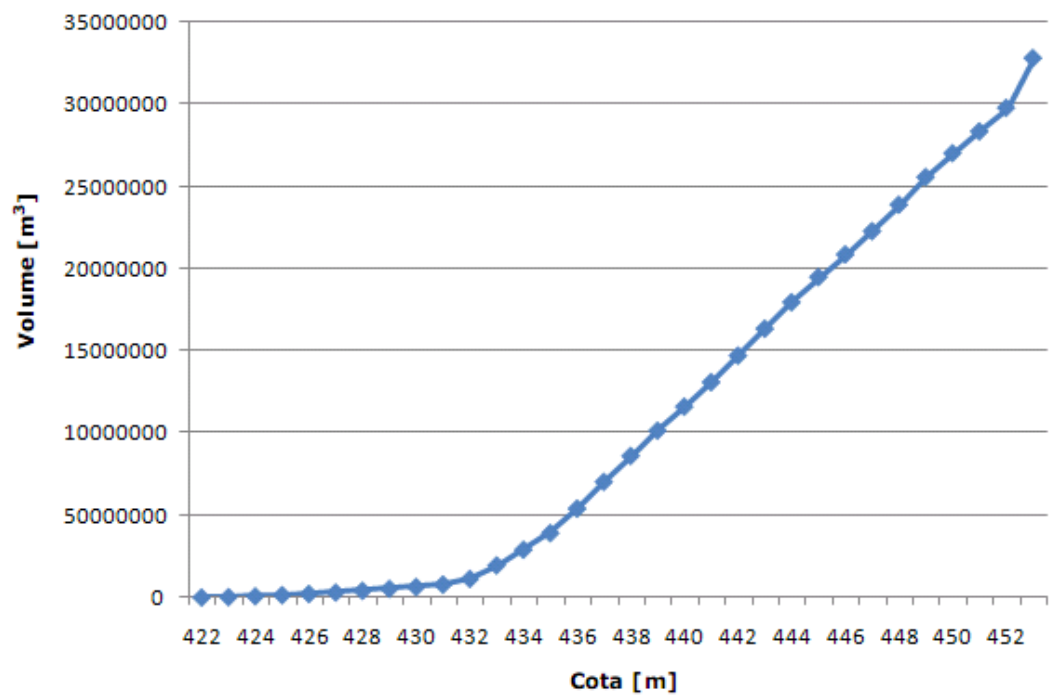


Figura 12 - Relação Cota x Volume do reservatório de Barra Bonita.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o auxílio do modelo matemático Mike Basin 2000 foram realizadas as simulações do cenário atual (vazões dos últimos 10 anos) e vazões de um período de seca para análise dos usos múltiplos da água do reservatório e o comportamento da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita na geração de energia elétrica. Um dos principais requisitos para a utilização de modelos de planejamento e gestão de recursos hídricos é a quantidade e representatividade das informações sobre o sistema a ser simulado. Fornecer parâmetros autênticos para o modelo é fundamental para permitir resultados confiáveis.

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

O gerenciamento do reservatório deve sempre proporcionar o uso múltiplo de suas águas maximizando os benefícios econômicos e sociais. Foi feita uma análise estatística que incluiu a satisfação da geração de energia como sendo o índice de desempenho. A satisfação é definida pela probabilidade de atendimento das demandas totais do sistema.

A avaliação dos resultados obtidos pelo Mike Basin foi feita a partir do índice de satisfação. Ou seja, pela probabilidade de atendimento das demandas totais nas restrições propostas aplicadas no algoritmo.

A digitalização de uma rede pelo usuário pode ser baseada em uma imagem importada, que ilustra o sistema fluvial natural, ou simplesmente usar uma tela em branco para se criar e simular uma rede qualquer.

Para o abastecimento urbano e industrial o Mike Basin disponibiliza três esquemas: captação, lançamento e a combinação dos dois. No sistema em estudo, usou-se este recurso para captação de água para eclusa de navegação e como descrita anteriormente, a demanda mensal para a eclusa é de 3,64 m³/s.

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

A rede de fluxo formulada para o sistema de recursos hídricos é representada pelo sistema da Figura 13 e são apresentados os principais componentes do sistema.

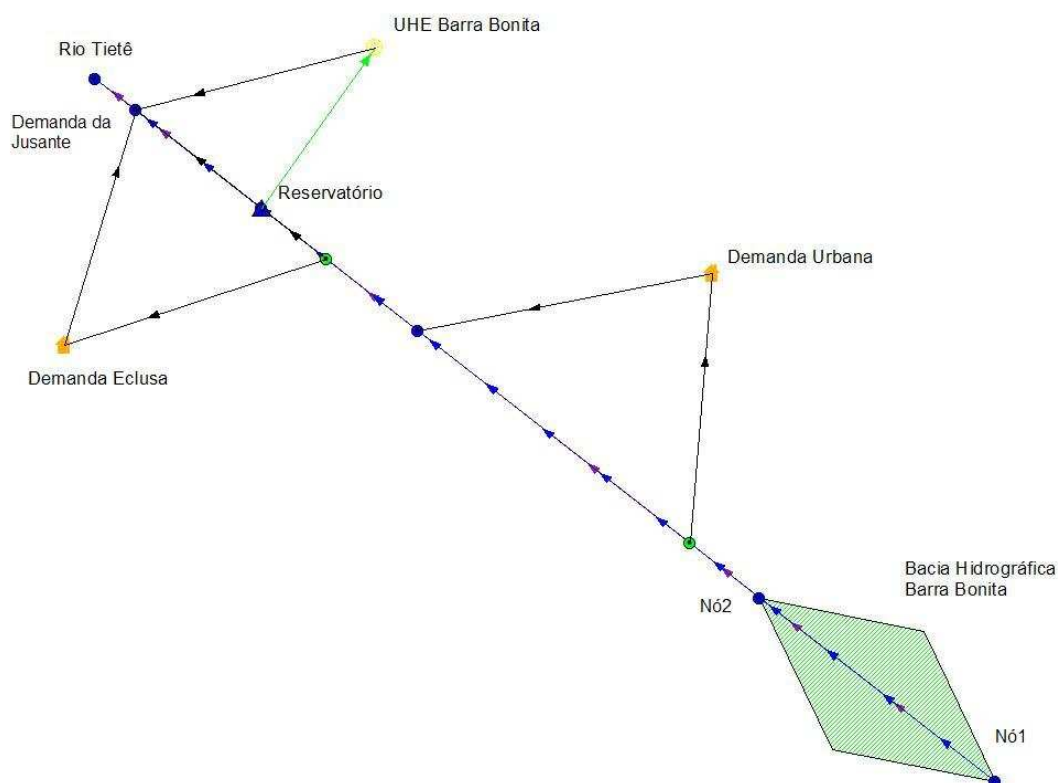


Figura 13 - Rede de fluxo do sistema de recursos hídricos do reservatório de Barra Bonita.

- *Nó1* – Nó simples: utilizado para caracterizar o início do sistema, o ponto mais a montante, representa a nascente da bacia e o ponto de partida da simulação.
- *Nó2* – Nó à montante do reservatório de Barra Bonita: representa o ponto das vazões afluentes ao reservatório. Neste nó são consideradas as vazões obtidas ao Operador Nacional do Sistema (ONS).
- *Bacia Hidrográfica de Barra Bonita* – Uma bacia hidrográfica ou bacia de drenagem de um curso de água é o conjunto de terras que fazem a drenagem da água das precipitações para esse curso de água e seus afluentes. Pode-se observar a bacia hidrográfica de Barra Bonita, representada pela Figura 10.
- *Rio Tietê* – O curso do rio Tietê foi obtido na base de dados georreferenciados da ANEEL (2000).
- *Reservatório de Barra Bonita* – Nó padrão considerado como um único armazenamento físico onde todos os usuários captam água respeitando uma política operacional. A representação da UHE Barra Bonita é feita através de um nó específico que desvia água do reservatório e lança para jusante. O nível de água para o início da simulação é adotado de acordo com o cenário a ser simulado.

- *Usina Hidrelétrica de Barra Bonita* – A representação da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita é feita através de um nó específico que desvia água do reservatório e lança para jusante.
- *Demanda da Eclusa* – É representada pelo nó de captação, usado para contabilizar o fornecimento de água para a mesma. O dado de entrada consiste em uma série temporal de demandas de água a serem retiradas do sistema.
- *Demanda urbana* – É representada pelo nó de captação, usado para contabilizar o fornecimento de água destinada para o abastecimento de captação e lançamentos superficiais descritos nas Tabela 2 e Tabela 3.
- *Demanda de jusante* – É caracterizada pelo nó de jusante que requer uma demanda mínima de água para que não prejudique a vazão ecológica do rio conforme as restrições operacionais apontadas pelo ONS.

Neste modelo de rede de fluxo aplicou-se o método de simulação contínua. E para a execução dos cálculos, a simulação inicia com os valores do reservatório fornecidos pelo usuário e durante a simulação irá automaticamente fazendo os cálculos para cada mês com os valores iniciais sendo igual ao volume final do mês anterior. Assim é feito até o final da simulação e os resultados são fornecidos no final de cada mês.

Ao simular no MIKE BASIN pode-se escolher essa simulação em dia ou mês. E ainda, os números de dias ou meses de cada passo. Este trabalho foi simulado mês a mês.

Os resultados das simulações foram analisados e apresentados sob a forma de gráficos e tabelas demonstrando o comportamento das variáveis de interesse ao longo do tempo. Foram simulados dois cenários diferentes para verificar o comportamento do reservatório ao longo do período de análise.

6.1 Simulação do Cenário atual

Para a simulação do sistema descrito anteriormente (e verificação do funcionamento da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita para a geração de energia elétrica), foram utilizados como dados de entrada, as vazões naturais afluentes ao reservatório de Barra Bonita durante um período de 10 anos recentes, tiradas entre o período de 1998 a 2007, retirados das séries de vazões médias divulgadas por ONS (2009) de 1931 a 2007 (Figura 4). Com esses dados recentes, foi elaborado o gráfico de vazão utilizado para a análise do período atual do reservatório de Barra Bonita, representado na Figura 14.

Os dados de entrada do reservatório e da usina foram relacionados no *software* Mike Basin com os seus valores já descritos, tais como a captação e lançamento superficiais,

regras operacionais, curvas operacionais, evaporação e precipitação, demanda da eclusa e todos os dados relacionados com a Usina Hidrelétrica de Barra Bonita e seu reservatório.

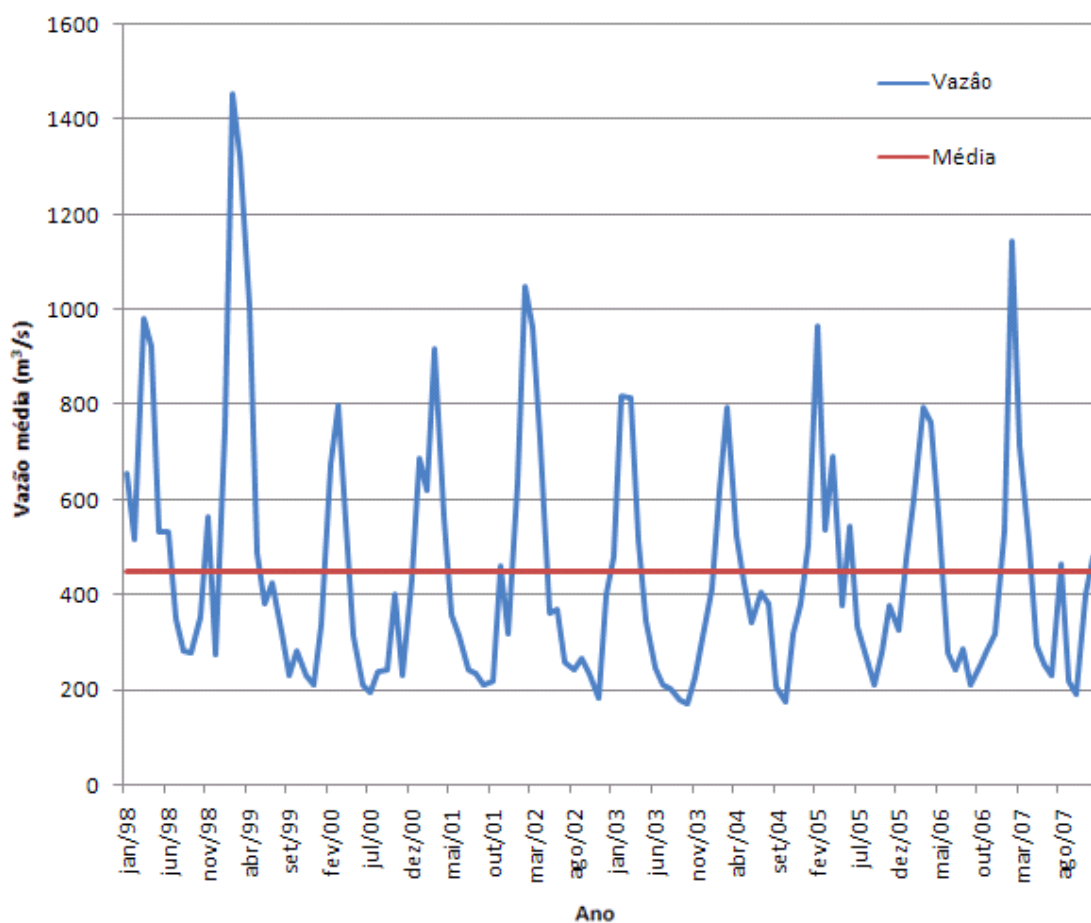


Figura 14 - Vazão mensal afluente ao reservatório de Barra Bonita de 1998 a 2007.

Observa-se na Figura 14 que o menor valor de vazão média mensal ocorreu no mês de setembro de 2003 com 171 m³/s e o maior valor de toda a série histórica ocorreu no mês de janeiro de 1999 com 1454 m³/s, sendo que a média mensal da série histórica foi de 450,28 m³/s.

Para uma análise e compreensão dos resultados gerados pela simulação computacional, realizou-se uma avaliação dos resultados através do índice de satisfação de geração de energia elétrica, representado por uma porcentagem em relação à potência instalada de 140,76 MW, apresentados na Figura 15 e na Figura 16. Também pode ser observada a quantidade de água que foi utilizada na simulação para cada período e suas respectivas potências geradas pela Usina Hidrelétrica de Barra Bonita.

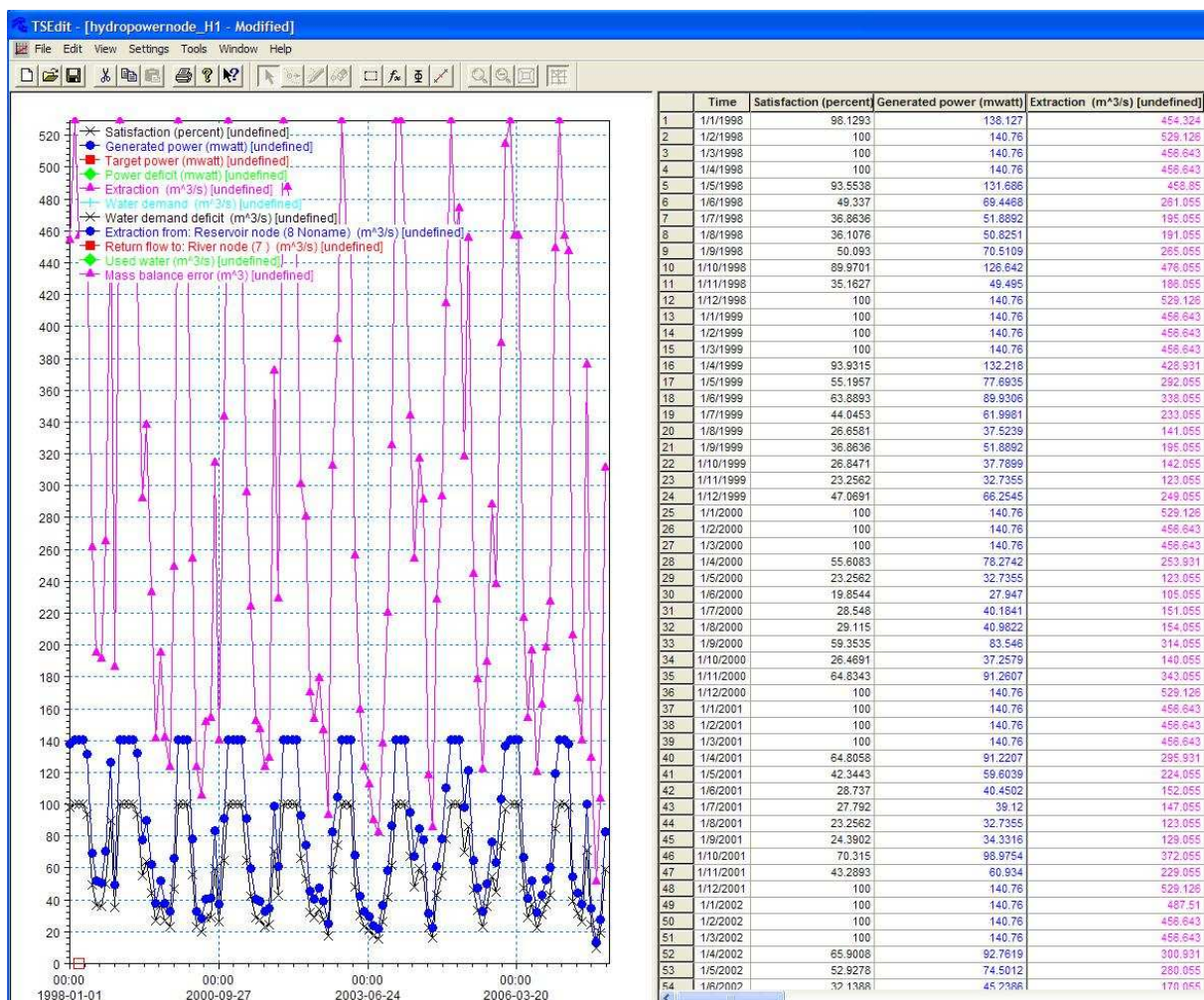


Figura 15 - Análise da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita vista no TSEdit para um cenário atual.

Durante os meses, o *software* realiza os dados de entrada das vazões de cada mês, juntamente com os dados de lançamento e captação superficiais, demanda da eclusa, evaporação e precipitação e todos os outros dados de entrada para o reservatório e para a usina. Com esses dados, calcula-se a quantidade de água do reservatório para cada mês e o balanço hídrico de armazenamento do reservatório e geração de energia elétrica é feito.

Para atender a demanda de produção de energia elétrica, a quantidade de água utilizada para geração varia durante os meses, como pode ser observada na Figura 16, mantendo a potência gerada alta durante os períodos chuvosos, atendendo toda a demanda em 100% de sua capacidade de geração (100% de satisfação). Já nos períodos de menor precipitação, o *software* armazena a água no reservatório, aumentando seu nível, utilizando menor quantidade de água para geração de energia e consequentemente, produzindo uma quantidade de energia menor que sua capacidade instalada.

	Time	Satisfaction (percent)	Generated power (mwatt)	Extraction (m ³ /s) [undefined]
1	1/1/1998	98.1293	138.127	454.324
2	1/2/1998	100	140.76	529.126
3	1/3/1998	100	140.76	458.643
4	1/4/1998	100	140.76	458.643
5	1/5/1998	93.5538	131.686	458.85
6	1/6/1998	49.337	69.4468	261.055
7	1/7/1998	36.8636	51.8892	195.055
8	1/8/1998	36.1076	50.8251	191.055
9	1/9/1998	50.093	70.5109	265.055
10	1/10/1998	89.9701	126.642	476.055
11	1/11/1998	35.1627	49.495	186.055
12	1/12/1998	100	140.76	529.126
13	1/1/1999	100	140.76	458.643
14	1/2/1999	100	140.76	458.643
15	1/3/1999	100	140.76	458.643
16	1/4/1999	93.9315	132.218	428.931
17	1/5/1999	55.1957	77.6935	292.055
18	1/6/1999	63.8893	89.9306	338.055
19	1/7/1999	44.0453	61.9981	233.055
20	1/8/1999	26.6581	37.5239	141.055
21	1/9/1999	36.8636	51.8892	195.055
22	1/10/1999	26.8471	37.7899	142.055
23	1/11/1999	23.2562	32.7355	123.055
24	1/12/1999	47.0691	66.2545	249.055
25	1/1/2000	100	140.76	529.126
26	1/2/2000	100	140.76	458.643
27	1/3/2000	100	140.76	458.643
28	1/4/2000	55.6083	78.2742	253.931
29	1/5/2000	23.2562	32.7355	123.055
30	1/6/2000	19.8544	27.947	105.055
31	1/7/2000	28.548	40.1841	151.055
32	1/8/2000	29.115	40.9822	154.055
33	1/9/2000	59.3535	83.546	314.055
34	1/10/2000	26.4691	37.2579	140.055
35	1/11/2000	64.8343	91.2607	343.055
36	1/12/2000	100	140.76	529.126
37	1/1/2001	100	140.76	458.643
38	1/2/2001	100	140.76	458.643
39	1/3/2001	100	140.76	458.643
40	1/4/2001	64.8058	91.2207	295.931
41	1/5/2001	42.3443	59.6039	224.055
42	1/6/2001	28.737	40.4502	152.055
43	1/7/2001	27.792	39.12	147.055
44	1/8/2001	23.2562	32.7355	123.055
45	1/9/2001	24.3902	34.3316	129.055
46	1/10/2001	70.315	98.9754	372.055
47	1/11/2001	43.2893	60.934	229.055
48	1/12/2001	100	140.76	529.126
49	1/1/2002	100	140.76	487.51
50	1/2/2002	100	140.76	458.643
51	1/3/2002	100	140.76	458.643
52	1/4/2002	65.9008	92.7619	300.931
53	1/5/2002	52.9278	74.5012	280.055
54	1/6/2002	32.1388	45.2386	170.055

Figura 16 - Nível de satisfação para geração de energia elétrica para um cenário atual.

A satisfação da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita mostra variação durante a simulação de acordo com os períodos de chuva, sendo que atinge valores mais baixos quando a prioridade da utilização da água é para encher o reservatório e para satisfazer toda a demanda do sistema. Existe uma maior satisfação no caso em que há maior extração de água voltada para a geração de energia elétrica.

6.2 Simulação de um Cenário Crítico de seca

Para a simulação do sistema de um cenário crítico de seca e verificação do funcionamento da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita para a geração de energia elétrica, foram utilizados como dados de entrada, as vazões naturais afluentes ao reservatório de Barra Bonita durante os 10 anos mais secos retirados das séries de vazões médias divulgadas por ONS (2009) de 1931 a 2007 (Figura 4). Com esses dados, foi elaborado o gráfico de vazão utilizado para a análise do período seco crítico do reservatório de Barra Bonita, representado na Figura 17.

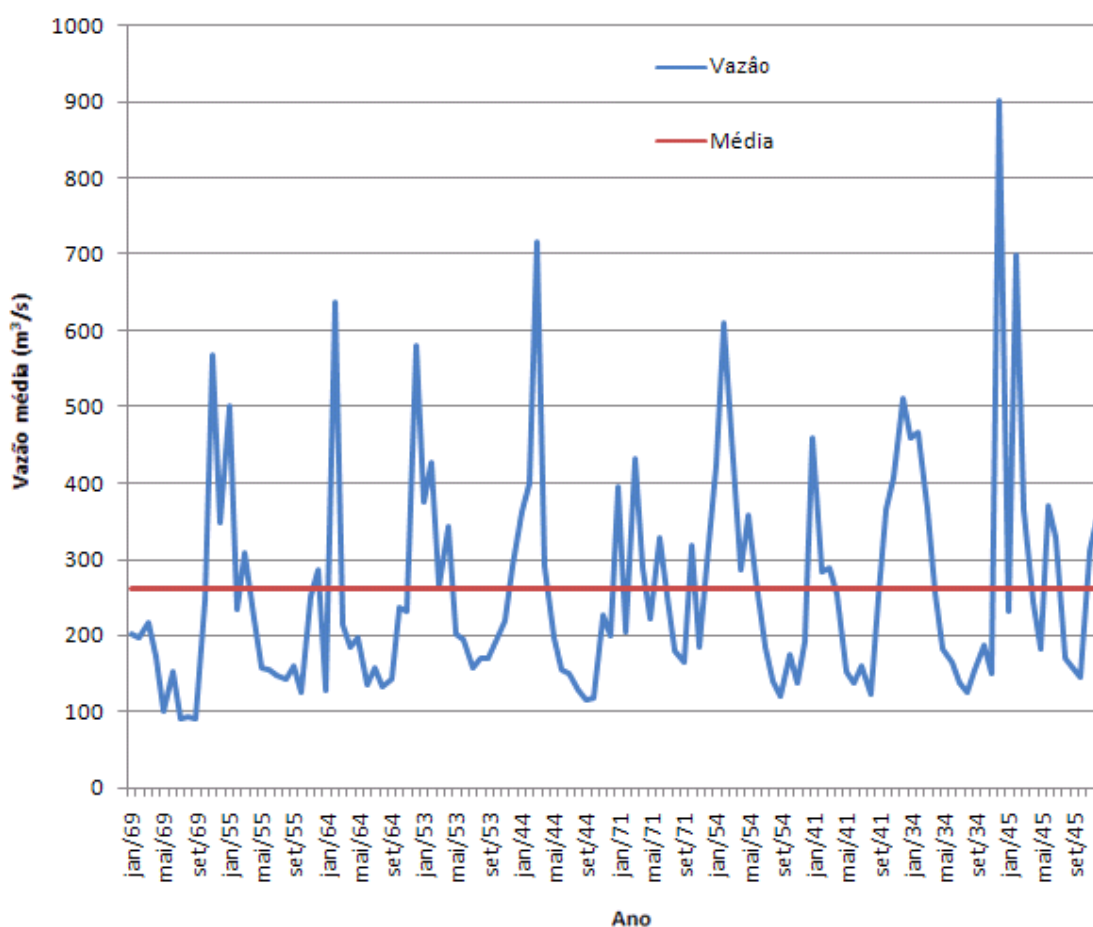


Figura 17 - Vazão mensal afluente ao reservatório de Barra Bonita nos 10 anos mais secos entre 1931 a 2007.

Os dados de entrada do reservatório e da usina foram relacionados no *software* Mike Basin com os seus valores já descritos, tais como a captação e lançamento superficiais, regras operacionais, curvas operacionais, evaporação e precipitação, demanda da eclusa e todos os dados relacionados com a Usina Hidrelétrica de Barra Bonita e seu reservatório.

Os anos mais secos retirados das séries de vazões médias divulgadas por ONS (2009) de 1931 a 2007 (Figura 4) foram os anos de 1969, 1955, 1964, 1953, 1944, 1971, 1954, 1941, 1934 e 1945. Observa-se na Figura 17 que o menor valor de vazão média mensal ocorreu no mês de setembro de 1969 com apenas 91 m³/s e o maior valor de toda a série histórica ocorreu no mês dezembro de 1934 com 901 m³/s, sendo que a média mensal da série histórica foi de 261,2 m³/s.

Para uma análise e compreensão dos resultados gerados pela simulação computacional, realizou-se uma avaliação dos resultados através do índice de satisfação de geração de energia elétrica, representado por uma porcentagem em relação à potência instalada de 140,76 MW, apresentados na Figura 18 e na Figura 19. Também pode ser observada a quantidade de água que foi utilizada na simulação para cada período e suas respectivas potências geradas pela Usina Hidrelétrica de Barra Bonita.

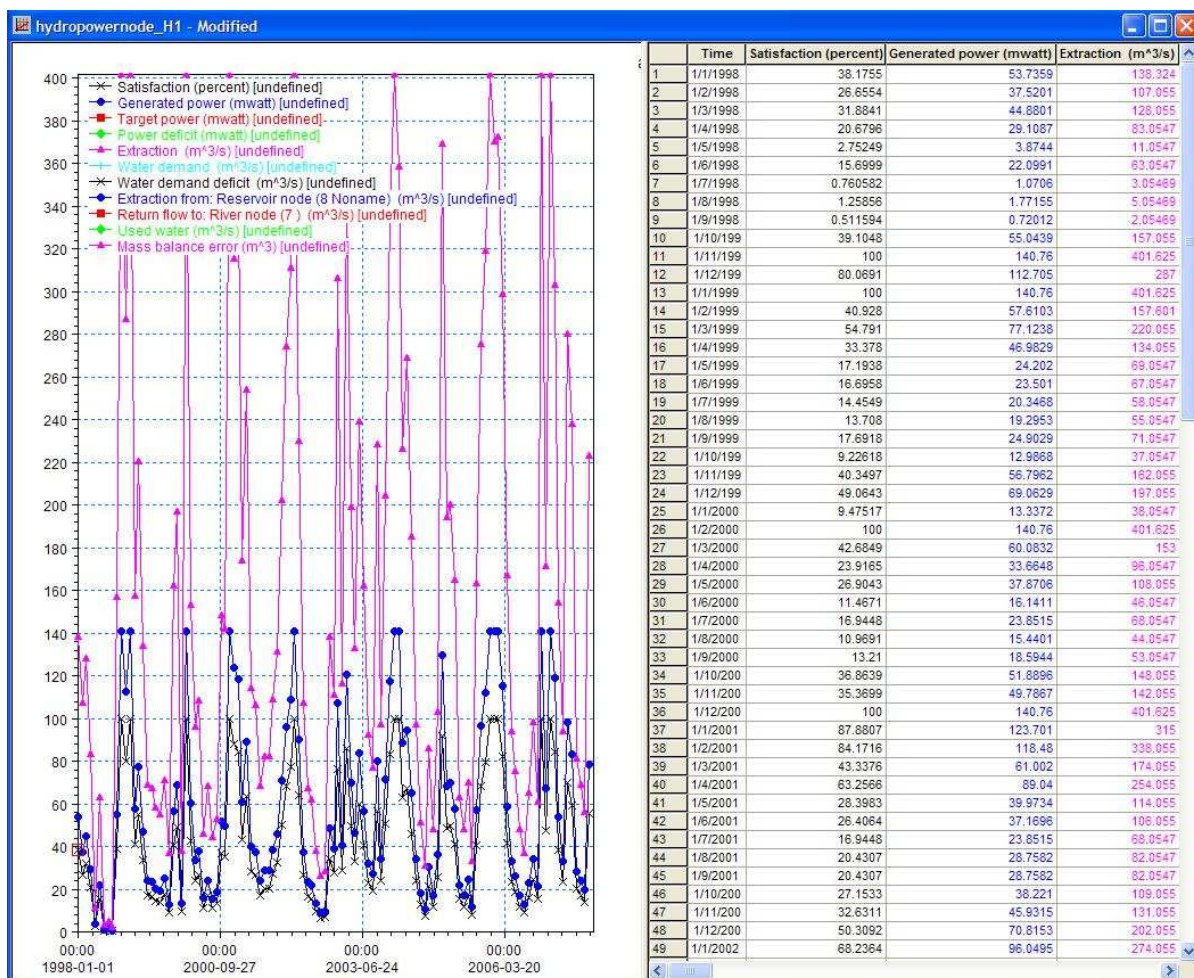


Figura 18 - Análise da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita vista no TSEdit para um cenário crítico de seca.

Para este cenário crítico de secas, a quantidade de água utilizada para geração de energia elétrica é menor e consequentemente o índice de satisfação também será menor em relação ao período de normalidade analisado previamente. Mesmo com poucos recursos hídricos, o *software* ainda consegue fazer com que a usina hidrelétrica trabalhe com sua capacidade máxima de geração em alguns meses, como descrito na Figura 19.

	Time	Satisfaction (percent)	Generated power (mwatt)	Extraction (m ³ /s)
1	1/1/1998	38.1755	53.7359	138.324
2	1/2/1998	26.6554	37.5201	107.055
3	1/3/1998	31.8841	44.8801	128.055
4	1/4/1998	20.6796	29.1087	83.0547
5	1/5/1998	2.75249	3.8744	11.0547
6	1/6/1998	15.6999	22.0991	63.0547
7	1/7/1998	0.760582	1.0706	3.05469
8	1/8/1998	1.25856	1.77155	5.05469
9	1/9/1998	0.511594	0.72012	2.05469
10	1/10/199	39.1048	55.0439	157.055
11	1/11/199	100	140.76	401.625
12	1/12/199	80.0691	112.705	287
13	1/1/1999	100	140.76	401.625
14	1/2/1999	40.928	57.6103	157.601
15	1/3/1999	54.791	77.1238	220.055
16	1/4/1999	33.378	46.9829	134.055
17	1/5/1999	17.1938	24.202	69.0547
18	1/6/1999	16.6958	23.501	67.0547
19	1/7/1999	14.4549	20.3468	58.0547
20	1/8/1999	13.708	19.2953	55.0547
21	1/9/1999	17.6918	24.9029	71.0547
22	1/10/199	9.22618	12.9868	37.0547
23	1/11/199	40.3497	56.7962	162.055
24	1/12/199	49.0643	69.0629	197.055
25	1/1/2000	9.47517	13.3372	38.0547
26	1/2/2000	100	140.76	401.625
27	1/3/2000	42.6849	60.0832	153
28	1/4/2000	23.9165	33.6648	96.0547
29	1/5/2000	26.9043	37.8706	108.055
30	1/6/2000	11.4671	16.1411	46.0547
31	1/7/2000	16.9448	23.8515	68.0547
32	1/8/2000	10.9691	15.4401	44.0547
33	1/9/2000	13.21	18.5944	53.0547
34	1/10/200	36.8639	51.8896	148.055
35	1/11/200	35.3699	49.7867	142.055
36	1/12/200	100	140.76	401.625
37	1/1/2001	87.8807	123.701	315
38	1/2/2001	84.1716	118.48	338.055
39	1/3/2001	43.3376	61.002	174.055
40	1/4/2001	63.2566	89.04	254.055
41	1/5/2001	28.3983	39.9734	114.055
42	1/6/2001	26.4064	37.1696	106.055
43	1/7/2001	16.9448	23.8515	68.0547
44	1/8/2001	20.4307	28.7582	82.0547
45	1/9/2001	20.4307	28.7582	82.0547
46	1/10/200	27.1533	38.221	109.055
47	1/11/200	32.6311	45.9315	131.055
48	1/12/200	50.3092	70.8153	202.055
49	1/1/2002	68.2364	96.0495	274.055

Figura 19 - Nível de satisfação para geração de energia elétrica para um cenário crítico de seca.

Normalmente não é utilizado todo o potencial instalado da usina, tendo sempre como prioridade o abastecimento das demandas hídricas para a população. Deste modo, o índice de satisfação mantém-se geralmente baixo, variando bastante durante os meses de simulação, assim como a variação no nível do reservatório.

7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO

Analisando-se os resultados das simulações, conclui-se que devido às várias demandas da bacia, os conflitos entre os usuários se tornam inevitáveis, principalmente nos períodos de estiagem em que a disponibilidade de água é insuficiente para atender todas essas demandas.

Através da descrição da bacia do reservatório de Barra Bonita pode-se perceber que se trata de um sistema complexo de recursos hídricos, sendo importante uma análise de operação e do desempenho do reservatório sob a ótica dos usos múltiplos da água. Foram analisados os conflitos atuais e uma simulação de um período de seca intensa decorrente dos usos múltiplos da água, através de simulações computacionais do modelo MIKE BASIN 2000. Os usos analisados foram baseados em abastecimentos urbano e industrial, irrigação e geração de energia elétrica, levando-se em consideração previsão de aumento das demandas de água do reservatório de Barra Bonita.

Os Cenários foram simulados a partir das séries geradas com seus respectivos dados de vazões e suas demandas de consumo. Através dos resultados observados, ficou nítido que as demandas para o reservatório da Usina Hidrelétrica de Barra Bonita no tempo atual apresentaram uma grande satisfação, mesmo tendo alguns períodos de seca. Com a escassez de chuva, o nível de água dos reservatórios da hidroelétrica baixou e para o período crítico de 10 anos de seca, diminuiu bastante a produção de energia, mas nunca deixou de gerar.

O balanço ocorrido no reservatório atendeu de forma adequada tanto os usos das demandas atuais quanto para a geração de energia elétrica nos dois cenários e não houve discrepância em relação à satisfação dos atendimentos. O aumento contínuo do consumo de energia devido ao crescimento populacional e o aumento de produção pelas indústrias fazem com que exista a necessidade de planejamento antecipado e execução de políticas econômicas governamentais para suprir, a tempo, as necessidades de expansão da produção de energia.

Em relação à utilização do *software* Mike Basin 2000, esse mostrou ser uma ferramenta versátil, de grande importância de suporte para o tomador de decisões, poderosa no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. Apresenta um rápido tempo de processamento das simulações, este que é de fundamental importância atualmente onde as tomadas de decisões são feitas em um curto espaço de tempo para que se possa solucionar conflitos e planejar a utilização da água de maneira mais eficiente atendendo a seus diversos usos, minimizando a existência de conflitos.

A aplicação de várias técnicas para o gerenciamento de recursos hídricos mostrou-se importante para a análise quantitativa do sistema. As técnicas de simulação representam melhor fisicamente o sistema, enquanto que os modelos de otimização são mais flexíveis aos diversos meios de formulação.

O estudo realizado no reservatório da Usina de Barra Bonita permitiu um melhor entendimento da dinâmica entre a disponibilidade e a oferta hídrica disponível na região e possibilitou a análise de um possível cenário crítico de seca. Espera-se que as informações reunidas possam servir de subsídio ao planejamento e gestão de recursos hídricos para o reservatório de Barra Bonita e que a utilização de diversas técnicas para essa análise possa ser aplicada também a outros reservatórios.

Por fim, o trabalho proposto é uma ferramenta de decisão generalizada de apoio ao planejamento e gestão dos usos dos recursos hídricos. Desta forma, estudos podem ser realizados para garantir um nível confiável de água capaz de atender as demandas requeridas pelos usos múltiplos no reservatório de Barra Bonita durante um período de tempo analisado.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALBERTIN, L.L. **Avaliação da quantidade e qualidade dos recursos hídricos superficiais da bacia hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim (SP) Através do Simulador Computacional MIKE BASIN**. 160 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.
- [2] ALMEIDA, C. A. Aspectos do ciclo de vida de espécies bentônicas nativas e sua utilização na avaliação da qualidade de sedimentos de lagos naturais e reservatórios. 2007. 181 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- [3] CORRÊA FILHO, C.R.R. **Avaliação de conflitos de usos múltiplos de água na bacia hidrográfica do rio Jaguari - SP, através de simulação computacional**. 107f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – SP. 2004.
- [4] DYRBAK, L. **Reservoir operation optimization**. Department of Hydrodynamics and Water Resources, Technical University of Denmark, July 2000. Disponível em: <<http://www.dhisoftware.com/mikebasin/Publications/index.htm>>.
- [5] LIMA, G. Riverhelp! : sistema de suporte a decisões para planejamento e gerenciamento integrado de recursos hídricos. 272 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - SP. 2007.
- [6] LOUCKS, D. P., FRENCH, P. N., TAYLOR, M. R., (1993). **IRAS – Interactive River-Aquifer Simulation**. Dept. of Civ. and Envir. Engrg., Cornell University, Ithaca, New York.
- [7] MAIA, J. L. **Técnicas para o gerenciamento quanti-qualitativo de reservatórios com usos múltiplos da água: estudo de caso do reservatório de Barra Bonita - SP**. 2009. 155 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- [8] OLIVEIRA, H. R. **Análise do aproveitamento múltiplo do reservatório de Barra Bonita – SP, através de aplicação de técnica de programação linear associada à modelo de rede de fluxo**. 2004. 147 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- [9] ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Inventário das restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidrelétricos**. ONS RE 3/201/208. Revisão 3-2008. 143 p. Rio de Janeiro, 2008.
- [10] PETRERE JR., M. Fisheries in large tropical reservoirs in South America. **Lakes & Reservoirs: Research and Management**, v. 2, p. 111-133, 1996.
- [11] PRADO, R. B. **Geotecnologias aplicadas à análise espaço temporal do uso e cobertura da terra e qualidade da água do reservatório de Barra Bonita, SP, como suporte à gestão de recursos hídricos**. 2004. 172 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

[12] Companhia de Engenharia de Tráfego - Disponível em:
<<http://www.cetsp.com.br/>>.

[13] GIS AND WATER RESOURCE MODELLING AT DH - Disponível em:
<<HTTP://www.crrw.utexas.edu/gis/gishyd98/dhi/mikebas/Mbasmain.htm>>.

[14] Agência de Desenvolvimento Tietê Paraná - Disponível em: <www.adtp.org.br>

[15] AES Tietê - Disponível em: < www.aestiete.com.br>