



ANÁLISE DE USOS MÚLTIPLOS DA ÁGUA UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL VISANDO A MINIMIZAÇÃO DE CONFLITOS

Luciana S. Peixoto
Frederico F. Mauad

RESUMO

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 artigo, 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: Recursos Hídricos; Simulação Computacional; Planejamento.

ABSTRACT

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 paper has the aim of analyzing the conflicts generated in the multipurpose reservoir system, in a basis of the State of Sao 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: Water Resources; Computational Simulation; Planning.

ANÁLISE DE USOS MÚLTIPLOS DA ÁGUA UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL VISANDO A MINIMIZAÇÃO DE CONFLITOS

Introdução

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. Além disso, 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.

Os avanços tecnológicos computacionais, juntamente com o aumento da complexidade dos problemas de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, têm incentivado o desenvolvimento e aperfeiçoamento de vários modelos matemáticos que auxiliam na tomada de decisão. YEH (1985) apresenta uma extensa revisão de modelos de otimização e simulação. Modelos como o *HEC-5* (1976), *SIMYLD-II* (*Texas Water Development Board*, 1970), *ACRES* (SIGVALDASON, 1976), *MODSIM* (LABADIE et al., 1984), *DWRSIM* (CHUNG et al., 1989) e *WATHNET* (KUCZERA, 1990) têm sido amplamente utilizados por pesquisadores do mundo todo, para auxiliar no planejamento de sistemas de recursos hídricos. Dentre os diversos modelos de simulação computacional, o modelo de simulação *IRAS - Interactive River-Aquifer Simulation*, desenvolvido pela *Universidade de Cornell*, Ithaca, NY, tem-se apresentado como um pacote computacional bastante utilizado no estudo quantitativo e qualitativo de sistemas de recursos hídricos simples e/ou sistemas de usos múltiplos e conflitantes. BENNET et al. (1994) aplicaram o modelo *IRAS* na bacia hidrográfica Raritan, onde os maiores desafios eram: o uso integrado de água superficial e subterrânea, a manutenção de vazões mínimas ao longo do Rio Raritan e o planejamento de estratégias necessárias para garantir o fornecimento de demandas futuras. O programa *IRAS* também foi utilizado por MAUAD (2000) na análise do confronto de usos múltiplos da água do aproveitamento hidroelétrico de Alqueva, em Portugal. O sistema simulado inclui os rios Guadiana e Ardila, a barragem de Alqueva e o açude de Pedrogão. Com o objetivo de determinar os níveis de garantia e satisfação de abastecimento dos diversos usos da água, atendendo a uma regra operacional estabelecida para várias prioridades, o modelo *IRAS* foi aplicado nessa pesquisa.

Este artigo 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 confiabilidade, a resiliência e a vulnerabilidade 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).

Estudo de Caso: Bacia do Sapucaí/Grande

A bacia do Sapucaí/Grande está localizada à noroeste do Estado de São Paulo, abrangendo uma área de drenagem de 9.077 km². A bacia apresenta como principais cursos d'água os rios Sapucaí, Grande, das Canoas, do Carmo, Ribeirão do Pinheirinho e Córrego do Esmeril.

O Rio Sapucaí drena uma área total de 650 km² e o comprimento do rio foz-nascente é de 337 km. Desde a sua nascente, o Rio Sapucaí (Fig. 1) 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 Guaira e Miguelópolis (*Relatório Final do Projeto Básico - CPFL, 2001*).

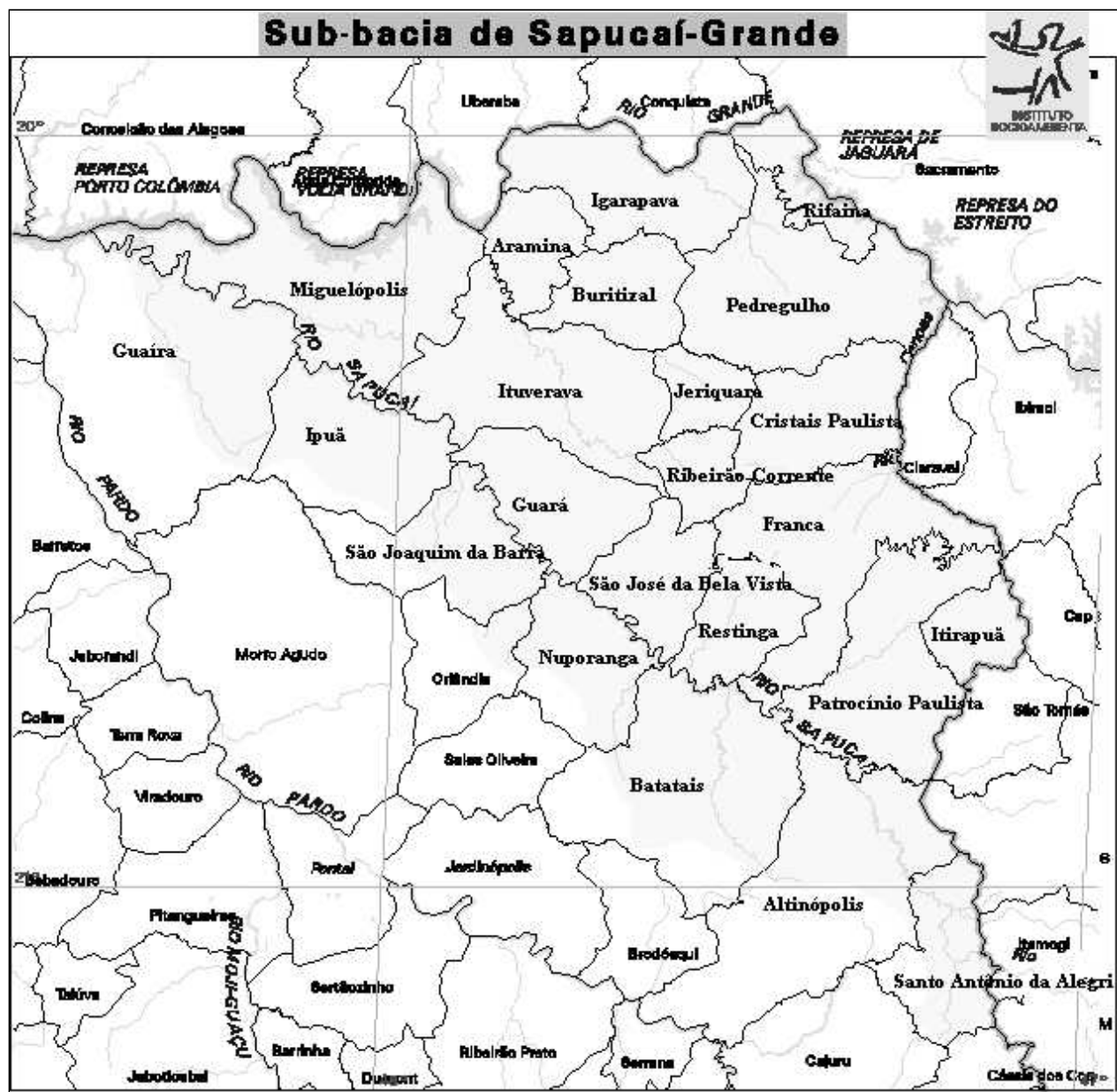


Figura 1. Bacia hidrográfica do Sapucaí/Grande.
Fonte: www.biotasp.org.br/biodiv/mapas/sgrande

Segundo o Comitê da Bacia Hidrográfica do Sapucaí-Mirim/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, representando cerca de 48% da população total da bacia. A demanda de água para o consumo urbano é da ordem de $1,27 \text{ m}^3/\text{s}$.

Alguns municípios desta região têm suas atividades econômicas sustentadas pela agricultura, tais como os municípios Guaira, Ipuã, Miguelópolis (cultivo de grãos), São Joaquim da Barra, Igarapava (cana-de-açúcar), Franca e Pedregulho (plantações de café). Conforme os dados de consumo dos diversos usuários da bacia (Tab. 1), obtidos junto ao *Plano Estadual de Recursos Hídricos* (PERH / 2000-2003) do Estado de São Paulo, o uso de água na irrigação é bastante expressivo, cerca de $9,86 \text{ m}^3/\text{s}$, se comparado aos demais usos, representando aproximadamente 87,2% da demanda total de água. Além das atividades agrícolas, há na região a presença de algumas indústrias diversificadas em nove ramos de atividades, sendo predominante as indústrias de curtume, correspondendo a 44% do total de indústrias. A demanda hídrica para o abastecimento industrial é de cerca de $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 1. Demandas de água na Bacia do Sapucaí/Grande

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

Fonte: PE RH (2000-2003).

Diversos estudos de implementação de aproveitamentos hidrelétricos ao longo do Rio Sapucaí vêm sendo desenvolvidos desde o início do século XX. Tais estudos conduziram à construção de duas pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), em operação, denominadas Dourados e São Joaquim, de propriedade da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL). O principal objetivo dos futuros aproveitamentos é o de conectar novas usinas do Rio Sapucaí ao sistema existente, gerando melhorias nos atuais níveis de suprimento energético da região.

O trecho escolhido para este estudo (Fig.2) compreende as cidades de Nuporanga, São José da Bela Vista, São Joaquim da Barra, Guará e Ipuã. Ao longo deste trecho estão localizadas as duas PCHs em operação, Dourados e São Joaquim e, três novas PCHs em fase final de projeto de implantação, Palmeiras, Anhanguera e Retiro, que perfazem juntas um total de 65,25 MW de potência instalada.



Figura 2. Localização dos aproveitamentos hidrelétricos estudados.
Adaptado do Projeto Básico (CPFL).

Descrição do Modelo

Desenvolvido pela *Resources Planning Associates, INC.* e pela *University of Cornell, Ithaca, NY*, em 1994, o modelo IRAS - *Interactive River-Aquifer Simulation*, utilizado neste artigo como ferramenta para o planejamento e gerenciamento de um sistema hídrico, permite a simulação de diversos usos com variações temporal e espacial. Podendo ser utilizado na avaliação não só do desempenho de qualquer configuração de um sistema

específico, como também do conjunto de políticas operacionais. No entanto, ele não é capaz de identificar as alternativas ou política operacional do sistema.

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 decréscimo 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.

No programa IRAS, um sistema hídrico é representado esquematicamente através de uma rede de fluxo. O sistema hídrico do rio Sapucaí foi representado por uma rede de nós e arcos, conforme mostrado na Fig. 3. Os nós representam reservatórios (Dourados, São Joaquim, Palmeiras, Anhanguera e Retiro), junção entre rios (Sapucaí e Ribeirão do Buriti), postos fluviométricos e locais de demanda (Urb.e Ind.1, Urb. e Ind.2, Irrigação e Jusante). Os arcos representam rios naturais (Rio Sapucaí e seu afluente, o Ribeirão do Buriti).

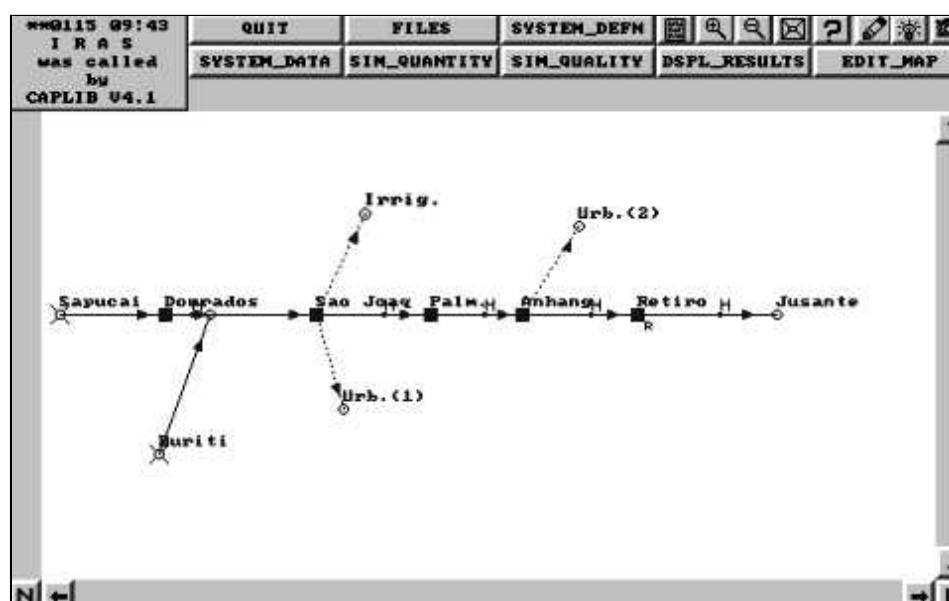


Figura 3. Rede de nós e arcos do modelo IRAS utilizada no estudo.

Através de uma interface gráfica são realizadas, no IRAS, 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.

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. Neste estudo de caso, considerou-se intervalo de simulação mensal, bem como vazões mensais e os volumes em milhões de m³.

Dados de Entrada

Os dados de entrada dependem do sistema a ser simulado e dos objetivos da simulação. Os elementos necessários para este estudo, incluem dados fluviométricos, de consumos e dos reservatórios. Os postos fluviométricos utilizados nesse estudo foram o Fazenda Velha, localizado no Rio Sapucaí e o Buriti, situado no Ribeirão do Buriti. Em virtude da ausência de dados de séries históricas representativas em um dos postos, optou-se em realizar a geração de séries de vazões mensais, através do *Modelo Multivariado Autoregressivo* de 1ª ordem. Esses dados são utilizados pelo IRAS por meio de um arquivo de fluxo, de extensão .FLW. Para cada reservatório, definiu-se a sua capacidade de volume de armazenamento ativo total e volume de armazenamento inicial, vazão ou liberação mínima, a regra de operação do reservatório em função do volume armazenado e a taxa de evaporação anual. Para cada ponto de consumo, foram indicados 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.

Políticas Operacionais no IRAS

Políticas de operação de reservatórios especificam a liberação requerida do reservatório como uma função do volume armazenado 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, enquanto outras identificam zonas de armazenamento, sendo cada uma associada a uma política de liberação do volume. No modelo IRAS, as duas opções estão disponíveis para definição de políticas operacionais dos reservatórios.

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 (Fig. 4) como uma função do armazenamento total do grupo de reservatórios.

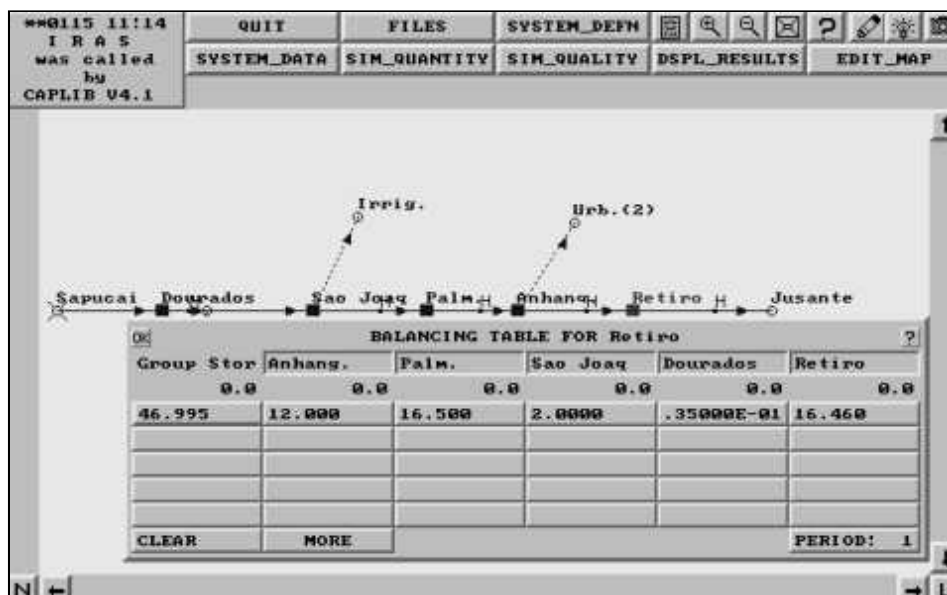


Figura 4. Metas de armazenamento para os reservatórios Dourados, São Joaquim, Palmeiras, Anhangüera e Retiro.

Dados Limites Utilizados no Modelo

Através do uso de valores limites iniciais, o modelo identifica quando e onde as variáveis do sistema podem estar em estado ou em escala não satisfatória. Atribuí-se a cada variável simulada dois valores limites iniciais, que dividem os valores possíveis da variável em três seções ou zonas. A cada uma dessas zonas é atribuída uma cor, que pode ser verde (satisfatório), amarelo (advertência) ou vermelho (insatisfatório). O programa IRAS permite seis possíveis combinações de atribuição de cor, conforme pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2. 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

Neste estudo, considerou-se que a zona mais baixa de cada variável é definida como falha ou escala "vermelha". Para todas as variáveis, com exceção das de armazenamento, a escala superior é a escala satisfatória ou "verde". A zona média, entre as escalas vermelha e verde, representa a escala de aviso ou "amarela". Ou seja, para todas as variáveis, exceto as de armazenamento, a alternativa 2 da tabela 2 foi escolhida. Para as variáveis de 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 2.

Índices de Desempenho

A fim de ajudar na avaliação do desempenho de projetos alternativos e políticas operacionais de sistemas de recursos hídricos, o modelo IRAS apresenta um conjunto de potencialidades que permite aos usuários definirem e quantificarem confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade de um sistema hídrico. O programa pode calcular e mostrar essas medidas estatísticas com respeito às funções, definidas pelo usuário, de fluxos e volumes de armazenamento, energia hidrelétrica, ou metas de concentração da qualidade da água em qualquer ponto do sistema (TAYLOR, 1998).

Em HASHIMOTO et al. (1982), as definições destes critérios são formuladas assumindo que o desempenho do sistema de recurso hídrico em questão pode ser descrito por um processo estocástico estacionário. Isto é, as distribuições de probabilidade que descrevem as séries de tempo de saída não mudam com o tempo.

Seja uma condição de saída do sistema representada pela variável aleatória X_t no tempo t que adota valores discretos 1, 2, 3, Em geral, os valores possíveis de X_t podem ser divididos em dois conjuntos: S, o conjunto de todos os dados de saída satisfatórios e F, o conjunto de todos os dados de saída insatisfatórios (falha). Em qualquer tempo t , assume-se que o dado da saída do sistema é um elemento de um destes conjuntos.

A confiabilidade de um sistema pode ser descrita pela frequência ou probabilidade α que um sistema está em um estado satisfatório:

$$\alpha = \text{Prob}[X_t \in S] \quad (1)$$

A confiabilidade, um conceito largamente utilizado em planejamento de recursos hídricos, é algumas vezes assumida ser o oposto do risco. Índice de confiabilidade pode ser definido como a probabilidade de não ocorrer uma falha no sistema e que forneça a medida em termos probabilísticos da capacidade do sistema para satisfazer os objetivos físicos sem falhas (garantir a satisfação dos consumos, produção de energia, etc.).

A resiliência descreve como rapidamente um sistema recupera-se ou retorna de uma falha, uma vez que uma falha tenha ocorrido. A resiliência é uma medida da variável se encontrar no próximo período de tempo em uma zona mais satisfatória, estando neste período de tempo em uma zona insatisfatória. Este índice pode ser descrito pela seguinte expressão matemática:

$$y = \frac{\text{Prob}\{X_t \in S \text{ e } X_{t+1} \in F\}}{\text{Prob}\{X_t \in F\}} \quad (2)$$

A vulnerabilidade refere-se à magnitude provável de uma falha. Este se apresenta como um importante critério na seleção e modelagem de um sistema de recursos hídricos. Para criar um índice matemático da vulnerabilidade do sistema, assume-se que a variável de desempenho do sistema X_t pode assumir valores discretos x_1, x_2, \dots, x_n . Atribuí-se a cada estado de falha discreto $x_j \in F$ um indicador numérico da severidade desse estado, denotado por s_j . Além disso, seja e_j a probabilidade que x_j , correspondente a s_j , seja o resultado mais insatisfatório e severo dentro de um conjunto de estados insatisfatórios F. Então, e_j é igual a $\text{Prob}\{x_j, \text{ correspondente a } s_j, \text{ é o resultado mais severo em F}\}$. A vulnerabilidade total do sistema seria a severidade máxima esperada dentro do conjunto de estados insatisfatórios:

$$v = \sum_{j \in F} s_j e_j \quad (3)$$

A idéia essencial da utilidade do índice de vulnerabilidade é que, não havendo nenhum sistema que seja totalmente seguro, é vantajoso que em caso de ocorrência de falhas, os prejuízos sejam o menor possível. A vulnerabilidade pode ser ainda descrita

como uma medida da dimensão da falha de um dado objetivo e é definida pela diferença entre o objetivo e o nível atingido.

Aplicação e Resultados

O modelo de simulação IRAS foi aplicado (PEIXOTO, 2002) como ferramenta de análise de conflitos de usos múltiplos da água gerados com a implantação de três novas PCHs, Palmeiras, Anhanguera e Retiro. Considerou-se neste estudo dois cenários. O primeiro cenário (Fig. 5) representa a situação atual do sistema hídrico, composto de dois cursos d'água, o Rio Sapucaí e o seu afluente, o Ribeirão do Buriti, e de duas usinas em operação, PCH Dourados e PCH São Joaquim.

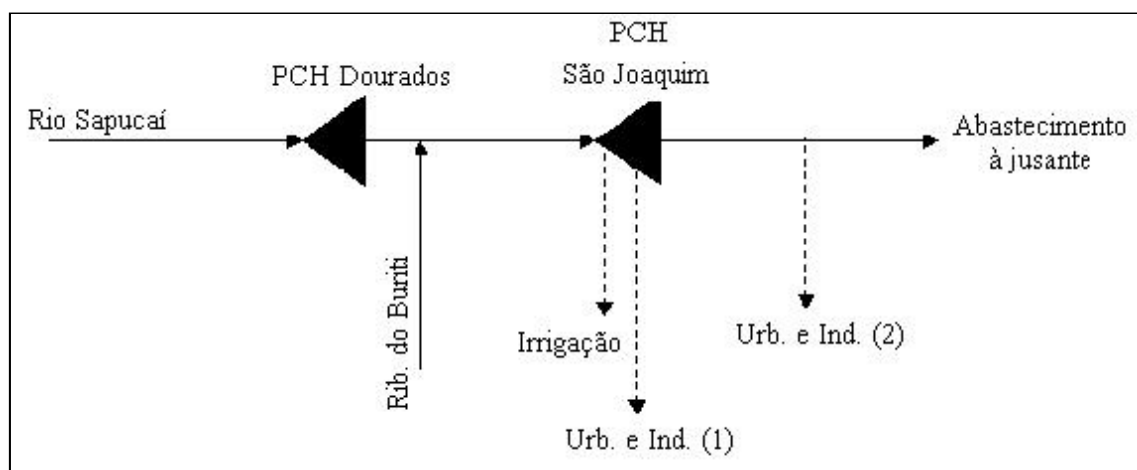


Figura 5. Esquema do sistema simulado (cenário 1).

O segundo (Fig. 6) corresponde, além das usinas em operação, à instalação das três novas usinas em projeto básico. Para ambos os cenários, são consideradas duas tomadas de água para o abastecimento urbano e industrial, sendo a primeira realizada no reservatório de São Joaquim e, outra, realizada no trecho do Rio Sapucaí (à jusante da PCH São Joaquim, para o cenário 1) e no reservatório de Anhanguera (para cenário 2). Também é considerada uma tomada d'água para irrigação no reservatório de São Joaquim. Admitiu-se, também, um consumo de água à jusante das usinas, que corresponde ao consumo na irrigação nos municípios de Guairá, Ipuã e Miguelópolis, acrescido do consumo das cidades localizadas à jusante das PCHs.

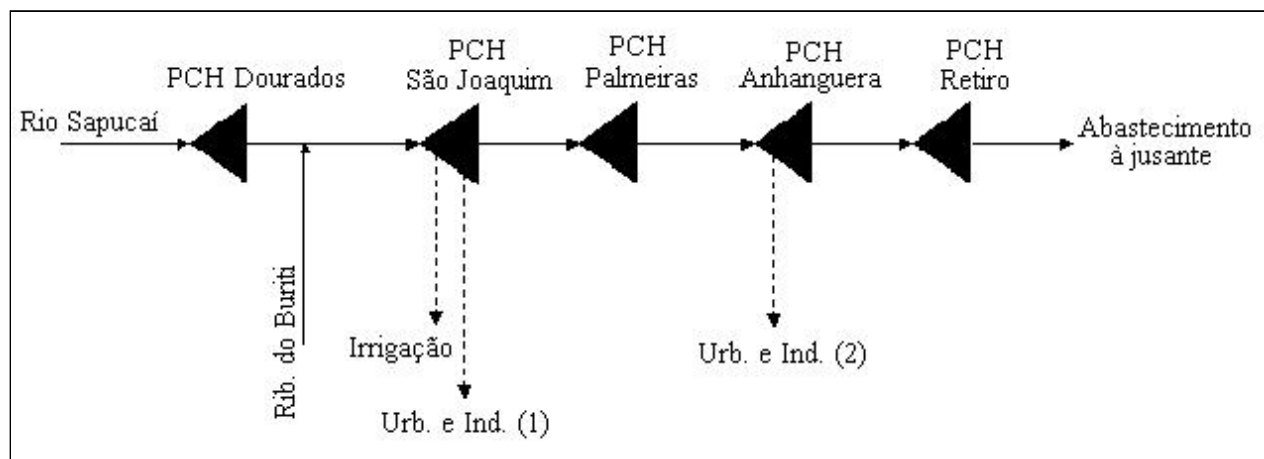


Figura 6. Esquema do sistema simulado (cenário 2).

Os dados de entrada do modelo referentes às pequenas centrais hidrelétricas localizadas no trecho do Rio Sapucaí estudado estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Dados principais das pequenas centrais hidrelétricas

Dados	Dourados	São Joaquim	Palmeiras	Anhangüera	Retiro
N.A. Montante ⁽¹⁾ (m)	587,34	582,65	556,00	540,50	523,00
N.A. Jusante ⁽²⁾ (m)	557,26	554,80	542,73	523,10	509,82
Área do reservatório ⁽³⁾ (km ²)	2,70	0,93	2,67	2,00	3,13
Volume acumulado total (hm ³)	0,035	2,00	16,50	12,00	16,46
Potência instalada (MW)	10,75	8,00	13,60	18,50	14,40

Fonte: Projeto Básico (Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL).

(1) NA máximo normal de operação à montante.

(2) NA máximo normal à jusante.

(3) Área do reservatório no NA máximo normal.

Os consumos urbano e industrial e à jusante considerados nos cenários 1 e 2 foram distribuídos igualmente ao longo do ano. A demanda de água para o abastecimento urbano e industrial 1 é de cerca de 5,68 milhões de m³ por ano, enquanto que a demanda anual para o abastecimento urbano e industrial 2 é de cerca de 7,25 milhões de m³ por ano. Estima-se que o consumo de água à jusante é de aproximadamente 220,8 milhões de m³ por ano.

Em relação ao consumo de água na irrigação, considera-se um consumo anual de cerca de 94,6 milhões de m³. Por não se possuir dados sobre a distribuição do valor do consumo na irrigação ao longo do ano, três distribuições mensais de consumo são simuladas, representando as três hipóteses consideradas no estudo. O período seco na região compreende os meses de abril a setembro. Admiti-se, na hipótese 1, uma distribuição igual do consumo na irrigação ao longo dos seis meses mais secos. Na hipótese 2, considera-se uma distribuição mais concentrada no trimestre mais seco (junho-julho-agosto). E, na hipótese 3, concentra-se o consumo de água na irrigação no trimestre mais seco do ano.

Além dos consumos citados acima, foram utilizados como dados de entrada do modelo, a taxa de evaporação mensal dos cinco aproveitamentos hidrelétricos. As usinas em estudo são operadas a fio d'água, ou seja, é mantido um nível de água constante nos

reservatórios. Portanto, considerou-se que os cinco aproveitamentos são operados interdependentemente como um grupo. A regra de operação foi definida como uma função do armazenamento total do grupo de reservatórios.

As simulações foram realizadas para as três hipóteses consideradas, para as configurações de sistema simulado conforme mostradas nas figuras 5 e 6. Analisando e comparando os resultados de saída do modelo para o cenário 1, observou-se que os índices de desempenho, ou seja, a confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, não se apresentaram significativamente diferentes para as três hipóteses simuladas.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados, para os cenários 1 e 2, dos índices de confiabilidade e resiliência para os reservatórios estudados.

Tabela 4. Índices de confiabilidade e resiliência para os reservatórios considerados

HIPÓTESE 1	CENÁRIO 1		CENÁRIO 2		
	Dourados	São Joaquim	Dourados	São Joaquim	Anhanguera
Confiab. Amarela	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Confiab. Verde	0,60	0,79	0,60	0,79	0,45
Resil. Vermelha	-	-	-	-	-
Resil. Amarela	0,29	0,47	0,29	0,47	0,37
HIPÓTESE 2	Dourados	São Joaquim	Dourados	São Joaquim	Anhanguera
Confiab. Amarela	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Confiab. Verde	0,60	0,81	0,60	0,81	0,53
Resil. Vermelha	-	-	-	-	-
Resil. Amarela	0,29	0,56	0,29	0,46	0,46
HIPÓTESE 3	Dourados	São Joaquim	Dourados	São Joaquim	Anhanguera
Confiab. Amarela	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Confiab. Verde	0,60	0,64	0,60	0,64	0,49
Resil. Vermelha	-	-	-	-	-
Resil. Amarela	0,29	0,48	0,29	0,48	0,43

Obs: Os índices de confiabilidade foram de 100% para os reservatórios Palmeiras e Retiro.

Os reservatórios de Dourados, São Joaquim e Anhanguera apresentam índices de confiabilidade variando de 100% a 60%. A resiliência para recuperação do sistema é de 29% (reservatório de Dourados), 56% (reservatório de São Joaquim) e 46% (reservatório de Anhanguera). De uma forma geral, a vulnerabilidade nos reservatórios citados acima são baixa, devido, sobretudo, as pequenas dimensões dos reservatórios.

Os resultados não variam muito com a distribuição ao longo do ano do consumo para irrigação. Apenas para a hipótese 3 (Tab. 5), 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.

Tabela 5. Índices de confiabilidade e resiliência para os consumos de água

	CENÁRIO 1			CENÁRIO 2		
HIPÓTESE 1	Urb. e Ind. 1	Urb. e Ind. 2	Irrigação	Urb. e Ind. 1	Urb. e Ind. 2	Irrigação
Confiab. Amarela	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75
Confiab. Verde	0,32	0,82	0,25	0,32	0,86	0,25
Resil. Vermelha	-	-	0,31	-	-	0,31
Resil. Amarela	0,20	0,81	-	0,20	0,89	-
HIPÓTESE 2						
Confiab. Amarela	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	0,75
Confiab. Verde	0,44	0,78	0,50	0,44	0,83	0,50
Resil. Vermelha	-	-	0,31	-	-	0,31
HIPÓTESE 2						
Resil. Amarela	0,42	0,83	0,33	0,34	0,83	0,33
HIPÓTESE 3						
Confiab. Amarela	1,00	1,00	0,67	1,00	1,00	0,67
Confiab. Verde	0,59	0,80	0,41	0,59	0,84	0,41
Resil. Vermelha	-	-	0,23	-	-	0,23
Resil. Amarela	0,54	0,81	-	0,54	0,84	-

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

Em relação ao consumo urbano e industrial, os resultados mostram confiabilidade amarela de 100% e verde de 59% e resiliência de 54%. Os índices estatísticos obtidos para irrigação são muito próximos para as três hipóteses, com exceção da hipótese 3, que apresenta valores de confiabilidade de amarela de 67% e verde de 41%, muito abaixo da faixa de valores mínimos de confiabilidade para irrigação, considerada por VAZ (1984).

Para a geração de energia elétrica, observam-se índices de confiabilidade muito altos (Tabelas 6 e 7), variando de 100% a 89% e, conseqüentemente baixo índice de vulnerabilidade (3% a 6%).

Tabela 6. Índices estatísticos em relação à geração de energia elétrica (cenário 1)

	CENÁRIO 1	
HIPÓTESE 1	Dourados	São Joaquim
Confiab. Amarela	0,97	0,98
Confiab. Verde	0,70	0,90
Resil. Vermelha	0,80	1,00
Resil. Amarela	0,30	0,70
HIPÓTESE 2		
Confiab. Amarela	0,97	1,00
Confiab. Verde	0,70	0,89
Resil. Vermelha	0,80	-
Resil. Amarela	0,30	0,77
HIPÓTESE 3		
Confiab. Amarela	0,97	0,99
Confiab. Verde	0,70	0,90
Resil. Vermelha	0,80	1,00
Resil. Amarela	0,30	0,80

Tabela 7. Índices estatísticos em relação à geração de energia elétrica (cenário 2)

CENÁRIO 2					
HIPÓTESE 1	Dourados	São Joaquim	Palmeiras	Anhanguera	Retiro
Confiab. Amarela	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98
Confiab. Verde	0,70	0,90	0,90	0,88	0,88
Resil. Vermelha	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00
Resil. Amarela	0,30	0,70	0,70	0,71	0,71
HIPÓTESE 2					
Confiab. Amarela	0,97	1,00	1,00	0,98	0,98
Confiab. Verde	0,70	0,89	0,89	0,87	0,87
Resil. Vermelha	0,80	-	-	1,00	1,00
Resil. Amarela	0,30	0,77	0,77	0,72	0,72
HIPÓTESE 3					
Confiab. Amarela	0,97	0,99	0,99	0,99	0,98
Confiab. Verde	0,70	0,90	0,89	0,87	0,86
Resil. Vermelha	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00
Resil. Amarela	0,30	0,80	0,80	0,80	0,69

Conclusões

Neste artigo 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 estudo.

Analisando os resultados de saída do modelo, observa-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.

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.

É importante ressaltar que como em qualquer modelo de simulação, os resultados obtidos dependem da validade dos dados de entrada. Entretanto, durante o levantamento

de dados realizado nessa pesquisa, observou-se a grande dificuldade na obtenção de dados e a discrepância dos dados obtidos, principalmente em relação aos dados de consumo de água na irrigação. Assim, em trabalhos futuros, 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.

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 usinas em operação, 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENETT, Michael et al. **Simulating Water Supply Systems of the Raritan Basin**. In: 21st Annual Conference, ASCE, Denver CO, pp. 433-436. Maio 23-26, 1994.

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

CHUNG, F. I.; ARCHER, M. C.; Devries, J. J. *Network flow algorithm applied to California aqueduct simulation*. **Journal of Water Resources Planning and Management**, n. 2, v. 115, 1989, pp. 131-147.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SAPUCAÍ-MÍRIM/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.

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

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

KUCZERA, G. **WATHNET: "Generalized Water Supply Simulation using Network Linear Programming"**. Dept. of Civ. Engrg. And Surv., University of Newcastle, Jul/1990.

LABADIE, J. W.; PINEDA, A.; BODE, D. **Network analysis of raw supplier under complex water rights and exchanges**. Documentation for program MODSIM3, Colorado Water Resources Institute, Fort Collins, Colo, 1984.

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

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

PEIXOTO, Luciana S. **A Utilização de Simulação Computacional no Gerenciamento de Usos Múltiplos da Água na Bacia Hidrográfica do Estado de São Paulo.** Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - Dissertação (Mestrado). 2002.

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

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

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

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

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

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

INFORMAÇÕES SOBRE OS AUTORES

[\(VOLTAR AO TEXTO\)](#)

Luciana S. Peixoto

Eng. Civil, MSc., Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC/USP.

lpeixoto@sc.usp.br

Frederico F. Mauad

Eng. Agrícola. Prof. Dr., Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC/USP, São Carlos, São Paulo, Brasil.

mauadffm@sc.usp.br

SUMÁRIO

