

# Uma Política de Operação Energética Baseada em Sistemas de Inferência *Fuzzy* Takagi-Sugeno

Ricardo A. L. Rabêlo<sup>1</sup>, Adriano A. F. M. Carneiro<sup>1</sup>, Rosana T. V. Braga<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade de São Paulo (USP)  
CEP 13566-590 – São Carlos – SP – Brazil

<sup>2</sup>Departamento de Sistemas de Computação  
Universidade de São Paulo (USP) – São Carlos –SP –Brazil

{ricardor,adriano}@sel.eesc.usp.br, rtvb@icmc.usp.br

**Abstract.** *This article presents an application of Takagi-Sugeno fuzzy inference systems to determine an energy operation policy for hydrothermal power generation. The policy is obtained through the energy operation optimization of hydroelectric plants. From this optimization it extracts the relationships between the stored energy of the system and the reservoir volume of each plant. These relationships are represented in the parameters of the consequents of the fuzzy rules of the Takagi-Sugeno inference model in order to reflect the optimal operating behavior of the hydroelectric power plants. The results illustrate the effectiveness of the proposed policy.*

**Resumo.** *Este artigo apresenta uma aplicação de sistemas de inferência fuzzy Takagi-Sugeno para determinar uma política de operação energética para sistemas hidrotérmicos de geração. A política proposta é obtida pela otimização da operação energética das usinas hidroelétricas. Desta otimização extraem-se as relações entre a energia armazenada do sistema e o volume do reservatório de cada usina. Estas relações estão representadas nos parâmetros dos consequentes das regras fuzzy do modelo de inferência de Takagi-Sugeno, a fim de refletir o comportamento operativo otimizado das usinas hidroelétricas. Os resultados encontrados ilustram a eficácia da política proposta.*

## 1. Introdução

O planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração, em sistemas com grande participação hidráulica, como é o caso do sistema brasileiro, tem como ponto fundamental o comportamento operativo dos reservatórios das usinas hidroelétricas. Para estes sistemas, o planejamento visa determinar uma política de operação energética que especifique como as usinas hidroelétricas devem ser operadas, de forma que os recursos disponíveis para a produção de energia elétrica sejam utilizados com economia e confiabilidade. Adicionalmente, o preço da energia elétrica no Brasil depende da energia armazenada nos reservatórios das usinas hidroelétricas, que por sua vez, em cada instante de tempo, depende das decisões operativas e das vazões afluentes aos reservatórios nos intervalos anteriores [Castro 2004].

Este trabalho apresenta uma metodologia baseada em sistemas de inferência *fuzzy* Takagi-Sugeno para obtenção de uma política de operação energética que busque refletir o comportamento otimizado dos sistemas hidrotérmicos

de geração, bem como da sua aplicação na simulação da operação energética de sistemas hidroelétricos. Utilizando uma ferramenta computacional de otimização não-linear, determinística e a usinas individualizadas [Rabelo et al. 2008], obtém-se o comportamento otimizado dos reservatórios em cascata, o qual será utilizado para ajuste dos parâmetros do sistema *fuzzy* de Takagi-Sugeno. Vários trabalhos [Carneiro and Kadowaki 1996, Cruz Jr and Soares 1995, Cruz Jr and Soares 1999, Kadowaki 1995, Sacchi et al. 2004a, Sacchi et al. 2004b, Soares and Carneiro 1993, Nakazawa et al. 2006, Silva Filho et al. 1999] relacionam-se com a metodologia proposta neste artigo, diferenciando somente na técnica empregada. Neste trabalho, empregou-se um sistema de inferência *fuzzy*, pois, procurou-se modelar, por meio de regras lingüísticas, o modo aproximado de raciocínio, pretendendo-se imitar a habilidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente de imprecisões e incertezas. Isto porque, sistemas *fuzzy* são potencialmente capazes de expressar e processar, de uma maneira sistemática, informações imprecisas, mal definidas e vagas. Adicionalmente, no projeto de sistemas *fuzzy*, pode-se contar com o conhecimento experimental de especialistas no domínio, fazendo com que a ação do sistema seja tão fundamentada e consistente quanto a deles.

## 2. Política de Operação Energética

Em várias etapas da abordagem ao problema do planejamento da operação é necessário simular a operação do sistema, quer seja com o objetivo de estudar seu desempenho [Kadowaki 1995], ou na construção do reservatório equivalente de energia [Arvanitidis and Rosing 1970], ou ainda nos procedimentos de desagregação destes sistemas. Deve-se citar ainda que a simulação também é utilizada no planejamento da expansão da geração [Fortunato et al. 1990].

A simulação nestes casos implica em se adotar uma política de operação energética. Uma política de operação energética pode ser entendida como um conjunto de regras de operação, uma para cada usina a reservatório do sistema hidroelétrico, que define como estas usinas vão ser operadas de forma acoplada [Silva Filho and Carneiro 2004]. Desta forma, uma política de operação energética é de fundamental importância, pois suas regras constituintes vão informar quanto cada usina deve gerar em cada intervalo do horizonte de planejamento. Estas regras exercem um papel particularmente relevante no caso do Brasil, já que na quase totalidade das usinas hidroelétricas brasileiras a altura de queda líquida depende, de forma não-linear, do volume do reservatório. Neste caso, o estado do reservatório afeta a produtividade da usina e, portanto, a trajetória de volume das usinas em um intervalo da operação irá afetar, de forma significativa, a energia total gerada pelo sistema. Nos sistemas em cascata, este efeito torna-se mais grave nas usinas mais a jusante, por onde passa toda a água, e onde uma pequena perda de produtividade pode significar uma grande perda de energia [Carneiro and Kadowaki 1996].

A política normalmente adotada pelo modelo empregado no sistema brasileiro é a de que, por hipótese, os reservatórios devem ser operados em paralelo, isto é, eles devem se manter com a mesma porcentagem de seus volumes úteis. Esta política de operação tem como maior atrativo sua simplicidade, entretanto, ela não obedece aos princípios da operação otimizada dos reservatórios [Sacchi et al. 2004c, Soares and Carneiro 1991].

Para obter uma política de operação energética que reflita o comportamento otimizado dos reservatórios, inicialmente, o sistema hidroelétrico é otimizado sob as mais

diversas condições de operação (mercado de energia e vazões afluentes) representativas das várias situações que podem ser encontradas na operação energética do sistema. Com a otimização, obtém-se um conjunto de pontos que relacionam o estado de cada reservatório das usinas, com o estado global do sistema hidroelétrico, representado pela energia armazenada [Soares and Carneiro 1993]. Para o ajuste dos pontos de operação, relacionados à operação energética otimizada, empregou-se o sistema de inferência *fuzzy* de Takagi-Sugeno. A existência de funções paramétricas nos consequentes de suas regras e a facilidade de se ajustarem a partir de um conjunto de dados de entrada e saída faz com que eles sejam intrinsecamente relacionados com a tarefa de aproximação de funções em geral [Rezende 2003]. Desta forma, a política de operação energética proposta baseia-se na utilização dos padrões do comportamento otimizado dos reservatórios, para definir os parâmetros do sistema de inferência *fuzzy*.

### 3. Sistemas *Fuzzy* Takagi-Sugeno

Seres humanos são capazes de lidar com processos bastante complexos, baseados em informações imprecisas ou aproximadas. A estratégia adotada pelos operadores humanos é também de natureza imprecisa e geralmente pode ser expressa em termos linguísticos. A teoria de conjuntos *fuzzy* e os conceitos de lógica *fuzzy* podem ser utilizados para traduzir em termos matemáticos a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras linguísticas. Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de ação como um conjunto de regras da forma “*se...então*”, um algoritmo passível de ser implementado em computador pode ser construído. O resultado é um sistema de inferência baseado em regras, no qual a teoria de conjuntos *fuzzy* e a lógica *fuzzy* fornecem o ferramental matemático necessário para se lidar com tais regras linguísticas [Oliveira Júnior et al. 2007].

Em geral, os sistemas de inferência *fuzzy* são fundamentados em regras do tipo “*se...então*”, e têm seu funcionamento baseado em três etapas: fuzziificação, procedimentos de inferência e defuzziificação.

A fuzziificação consiste em transformar as entradas, que são variáveis quantitativas, em conjuntos *fuzzy*, ou seja, em variáveis qualitativas. Assim, a fuzziificação indica que há atribuição de valores linguísticos, descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência às variáveis de entrada. Desta forma, a fuzziificação pode ser considerada uma espécie de pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada, reduzindo fortemente o número de valores a serem processados. Uma menor quantidade de valores processados significa que há um menor esforço computacional [Shaw and Simões 1999]. O modelo a ser implementado tem uma variável de entrada, que é o valor normalizado da energia armazenada no sistema (EAS), definida respectivamente no conjunto de termos linguísticos (Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta)(Figura 1).

Dois modelos de inferência *fuzzy* são particularmente importantes:

- Modelo de Mandani: uma regra típica desse modelo é: se  $x$  é  $A$  e  $y$  é  $B$  (onde  $A$  e  $B$  são conjuntos *fuzzy*), então  $Z$  é  $C$  ( $C$  é um conjunto *fuzzy*). O processo de defuzziificação visa obter um resultado não-*fuzzy* na saída do sistema de inferência;
- Modelo de Takagi-Sugeno: uma regra típica desse modelo é: se  $x$  é  $A$  e  $y$  é  $B$ , então,  $z = f(x, y)$ , onde  $A$  e  $B$  são conjuntos *fuzzy* e  $f$  é uma função

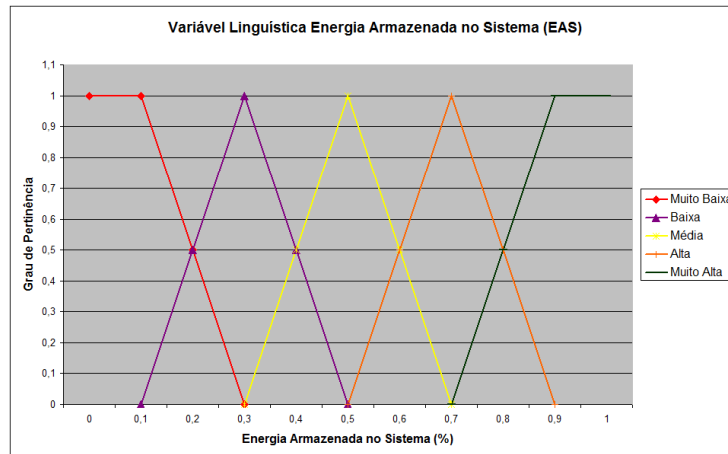


Figure 1. Funções de pertinência da variável de entrada EAS.

polinomial de  $x$  e  $y$ . Portanto, um processo de defuzzificação é desnecessário [Zimmermann 2001]. Este modelo foi proposto como um esforço para desenvolver uma abordagem sistemática para gerar regras *fuzzy* a partir de um conjunto de dados de entrada e saída [Ross 2004]. O procedimento de inferência no modelo Takagi-Sugeno consiste em obter todas as contribuições individuais  $y_i$  advindas de cada uma das regras ativadas. Após esta etapa, deve-se ponderar (combinar) todas as contribuições individuais para produzir a resposta final  $y$ .

Para o modelo *fuzzy* de Takagi-Sugeno proposto neste trabalho, têm-se 5 regras de inferência para cada sistema *fuzzy* implementado<sup>1</sup>. Em termos formais, considerando o sistema constituído de uma variável linguística de entrada (EAS), tem-se as seguintes regras:

- Regra 1: Se (*EAS é Muito Baixa*) Então  $y_1 = f_1(EAS) = a_1 \cdot EAS + b_1$
- Regra 2: Se (*EAS é Baixa*) Então  $y_2 = f_2(EAS) = a_2 \cdot EAS + b_2$
- Regra 3: Se (*EAS é Média*) Então  $y_3 = f_3(EAS) = a_3 \cdot EAS + b_3$
- Regra 4: Se (*EAS é Alta*) Então  $y_4 = f_4(EAS) = a_4 \cdot EAS + b_4$
- Regra 5: Se (*EAS é Muito Alta*) Então  $y_5 = f_5(EAS) = a_5 \cdot EAS + b_5$

Para cada uma das 5 regras que compõem cada sistema *fuzzy*, aplica-se regressão linear nos pontos pertencentes ao seu domínio de ativação, utilizando os pontos de entradas/saídas conhecidos (obtidos da otimização da operação energética para o histórico de vazões afluentes mensais), a fim de se determinar os parâmetros  $(a_i, b_i)$  de cada uma das 35 funções polinomiais relativas aos consequentes dos sistemas *fuzzy*. A partir daí, pode-se colocar o sistema *fuzzy* em operação. No caso particular, a operação de cada sistema de inferência *fuzzy* determina o volume operativo de cada uma das usinas do sistema hidroelétrico.

<sup>1</sup>Um sistema *fuzzy* com múltiplas saídas pode ser transformado convenientemente em múltiplos sistemas de saída única. Portanto, foram implementados 7 sistemas *fuzzy*, um para cada usina hidroelétrica, totalizando 35 regras de produção.

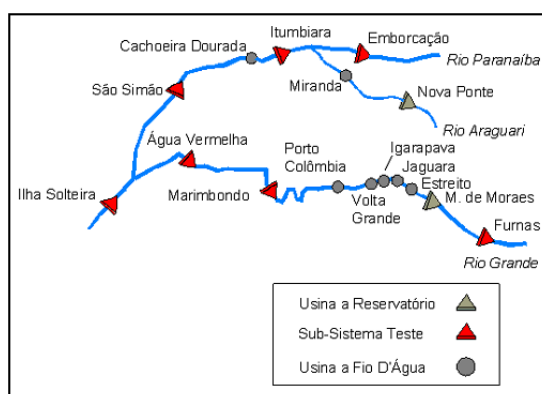
## 4. Testes e Resultados Observados

### 4.1. Sistema Teste para Uma Usina Hidroelétrica

A operação energética de um hipotético sistema isolado com apenas um reservatório pode ser considerada simples, pois o operador desse sistema não necessita de nenhuma política de operação: deve apenas atender ao mercado de energia elétrica. Desta forma, se as vazões afluentes naturais forem menores que a vazão turbinada necessária para atender ao mercado, deve-se esvaziar o reservatório; se forem maiores, deve-se estocar o excedente desta vazão afluente até o volume máximo operativo. Quando, porém, há um sistema de usinas em cascata e em paralelo, a situação muda por completo, pois existem várias maneiras de armazenar ou de esvaziar os reservatórios, cada uma com resultados potencialmente diferentes. Estes sistemas em cascata serão considerados para os estudos de caso deste trabalho.

### 4.2. Sistema Teste para Sete Usinas Hidroelétricas

A Figura 2 ilustra o sistema hidroelétrico para avaliar e validar a política de operação energética proposta, baseada no sistema de inferência *fuzzy*. Este sistema hidroelétrico é composto por 7 das mais importantes usinas hidroelétricas do sistema sudeste brasileiro e corresponde à 13220MW de capacidade instalada. Além do mais, ele é considerado como um sistema complexo, com usinas de grande porte, interligadas em paralelo e em cascata.

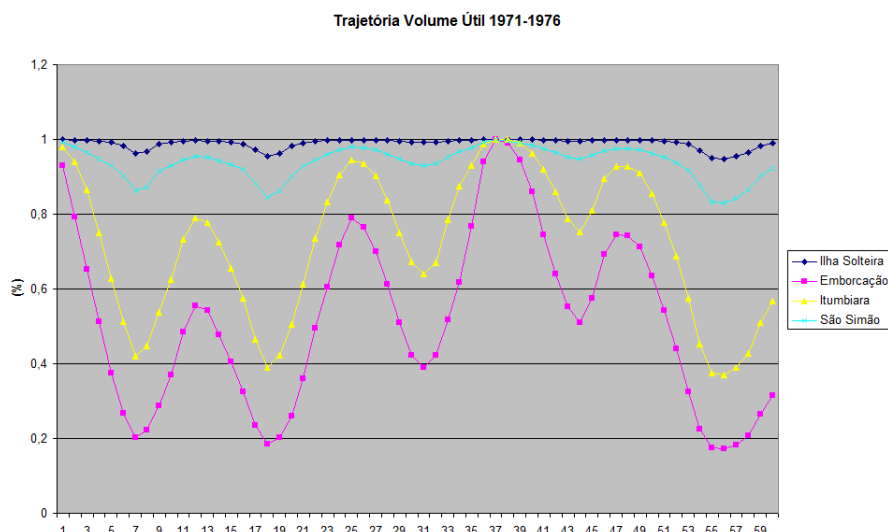


**Figure 2. Sistema hidroelétrico utilizado no trabalho.**

Para verificar o desempenho da política de operação energética proposta, utiliza-se uma ferramenta computacional de simulação da operação energética [Rabelo et al. 2009], a qual permite uma avaliação energética da operação de sistemas hidroelétricos de geração. A simulação da operação energética envolvendo um período do histórico de vazões afluentes ou com vazões afluentes médias propõe verificar como um sistema hidroelétrico se comportaria caso fosse submetido a determinadas condições de operação (mercado de energia elétrica, vazões afluentes naturais, restrições operativas, política de operação energética, volume inicial, etc.). Assim, para efetuar a comparação entre as duas políticas de operação energética, as simulações da operação são realizadas sob as mesmas condições de operação, com exceção para a política de operação energética.

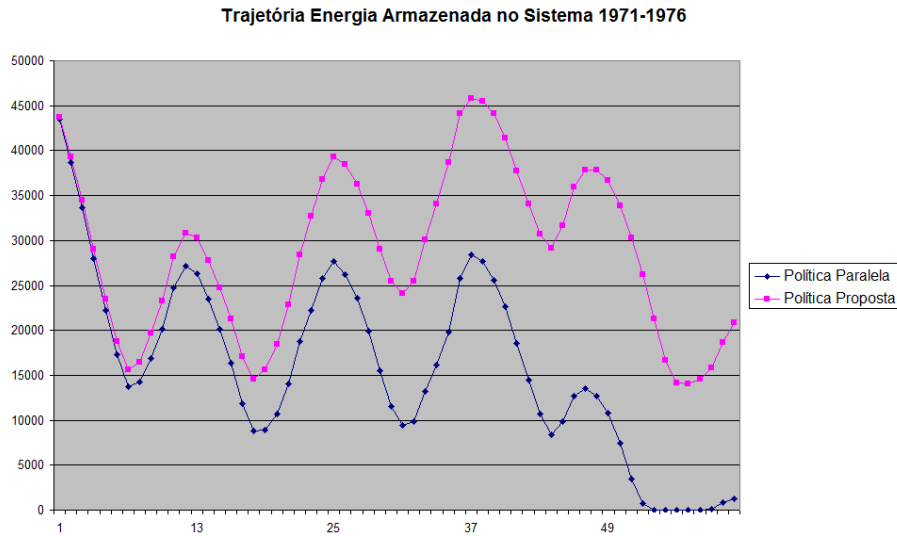
A Figura 3 apresenta as trajetórias de volumes de quatro das sete usinas, para o período 1971-1976, considerando a política de operação energética proposta, fornecida

pelo sistema de inferência *fuzzy*. Ao observar-se as trajetórias de volume, pode-se verificar que a simulação utilizando a política proposta realizou uma operação que segue os princípios da operação otimizada [Soares and Carneiro 1991]. A usina de Emborcação, situada mais a montante, varia de forma considerável a quantidade de água armazenada no seu reservatório, enquanto a usina de Itumbiara, localizada imediatamente a jusante, varia de forma menos considerável. A usina de Ilha Solteira, localizada mais a jusante, praticamente não altera seu volume útil, mantendo-se cheia com produtividade máxima. A energia armazenada em uma usina hidroelétrica é valorizada pela produtividade de todas as usinas a sua jusante. A altura de queda líquida da usina mais a jusante, por exemplo, afeta a energia armazenada de todas as usinas da cascata [Carneiro et al. 1988]. Desta forma, a operação otimizada dos reservatórios para geração de energia elétrica prioriza o enchimento de jusante para montante, e o deplecionamento de montante para jusante. Portanto, as trajetórias de volumes úteis obtidas com a política proposta seguem este importante princípio da operação otimizada.



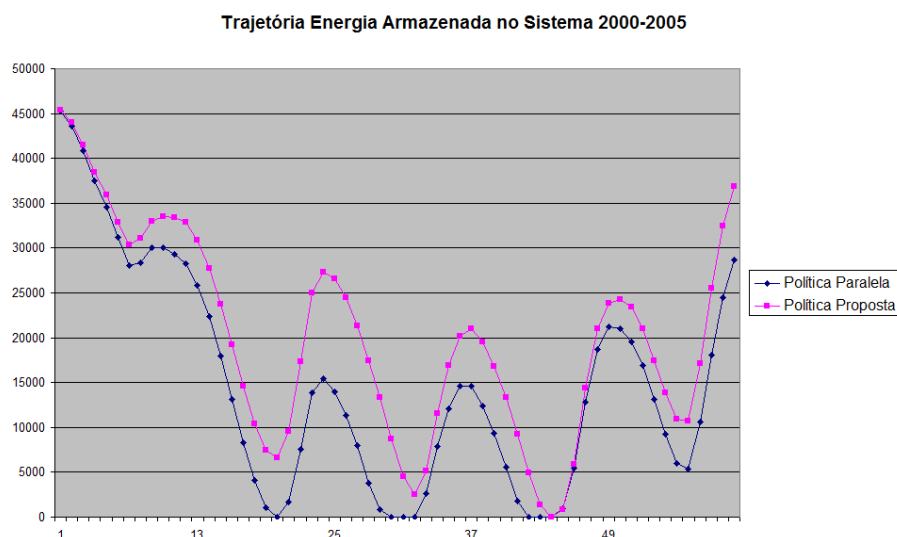
**Figure 3. Trajetórias de volume de algumas usinas do sistema hidroelétrico com a política de operação proposta.**

A fim de evidenciar a maximização dos benefícios hidroelétricos, a Figura 4 ilustra a trajetória de energia armazenada no sistema para as simulações utilizando as duas políticas de operação energética ao longo do horizonte de planejamento. Pode-se afirmar que a política proposta maximiza os benefícios hidroelétricos do sistema hidrotérmico de geração, pois atende ao mesmo mercado de energia elétrica, utilizando menos recursos hidroelétricos. Adicionalmente, ao final do horizonte, observa-se que a política de operação paralela não consegue manter os níveis de armazenamento próximos dos níveis de armazenamento estabelecidos pela política de operação otimizada. Pelo contrário, a política de operação energética paralela chega ao final da simulação com todos os reservatórios quase vazios, fazendo com que a confiabilidade e o custo da operação estejam extremamente comprometidos na operação contínua do sistema. Portanto, a política proposta permite que a simulação da operação do sistema hidroelétrico seja consistente com a operação contínua do sistema, já que o mesmo não deixa de operar com o final do horizonte de planejamento.



**Figure 4. Trajetórias de energia armazenada no sistema utilizando-se as duas política de operação energética.**

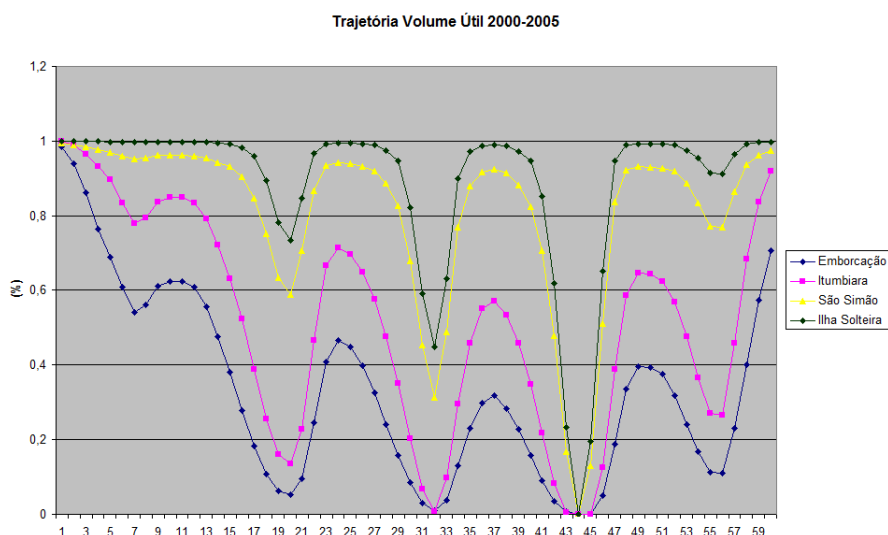
Considerando-se o horizonte de planejamento entre os anos de 2000-2005, pode-se confirmar a eficiência na utilização dos benefícios hidroelétricos de geração, pela política de operação proposta. Pela Figura 5, pode-se notar que o esvaziamento do sistema de reservatórios é bem mais intenso quando se emprega a política de operação paralela. Adicionalmente, frisa-se que, durante todo o horizonte, sempre a política de operação energética proposta apresentou valores mais altos de energia armazenada, confirmando que esta política necessita utilizar menos água para atender ao mercado de energia.



**Figure 5. Trajetórias de energia armazenada no sistema utilizando-se as duas política de operação energética.**

Na Figura 6 exibem-se as trajetórias de volume útil de quatro das sete usinas. Mais uma vez, percebe-se que a trajetória de volume das usinas obedece aos princípios da

operação otimizada dos reservatórios, pois as oscilações de volume dos reservatórios são feitas em função do posicionamento deles na cascata. Verifica-se que o reservatório mais a montante (Emborcação) apresentou maiores oscilações e foi o primeiro a esvaziar-se. A usina de Itumbiara, em posição intermediária na cascata, apresentou médias oscilações, enquanto a usina de Ilha Solteira, mais a jusante, apresentou menores oscilações, buscando operar como uma usina a fio d'água, esvaziando por último e enchendo antes que as outras usinas.



**Figure 6. Trajetórias de volume de algumas usinas do sistema hidroelétrico com a política de operação proposta.**

## 5. Conclusões

A política de operação energética proposta foi aplicada e comparada com a política de operação paralela, a um sistema teste de sete usinas hidroelétricas do sistema sudeste brasileiro. Todos os resultados evidenciaram a eficiência da política proposta, tomando-se como parâmetros tanto a energia armazenada no sistema, como a trajetória individual de armazenamento dos reservatórios das usinas, obtidos das simulações. Com relação à energia armazenada no sistema, todos os testes ilustraram que a política de operação proposta necessita de menos recursos hidráulicos para atender ao mesmo mercado de energia elétrica sob as mesmas condições de operação que a política paralela. Com relação à trajetória de armazenamento dos reservatórios, com a política de operação energética proposta, as usinas de jusante seguiram a tendência de permanecerem cheias, mantendo alta produtividade, e por consequência, valorizando os volumes de água que fluem por elas. Já as usinas de montante foram responsáveis pela regularização das vazões afluentes, amortecendo a disponibilidade irregular e aleatória dos recursos hídricos. Desta forma, pode-se assegurar que a política de operação energética proposta pode assegurar um fornecimento mais confiável e econômico da energia elétrica. Econômico porque a política proposta necessita de menos recursos de geração que a política paralela. Confiável porque a política proposta permite a operação do sistema hidroelétrico com níveis superiores de armazenamento nos reservatórios, diminuindo a possibilidade de déficits do sistema de geração. Portanto, pode-se evidenciar a potencialidade da política proposta na otimização da utilização dos recursos hidroelétricos, voltados para a geração de energia



elétrica. Ressalta-se que a abordagem proposta é bastante condizente com os objetivos do planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de geração, pois, a otimização dos recursos hidráulicos busca minimizar a complementação térmica. Dessa forma, quanto maior for o desempenho da política de operação energética na utilização dos recursos hidroelétricos de geração, menor será a complementação fornecida pelo sistema termoelétrico.

Uma das principais vantagens encontradas, na utilização dos sistemas de inferência *fuzzy*, durante o desenvolvimento deste trabalho, refere-se à inclusão da experiência dos autores, no estudo do comportamento otimizado dos reservatórios para geração de energia elétrica, na definição dos parâmetros dos sistemas *fuzzy* implementados. Pôde-se utilizar esta experiência, de forma direta, para definir os termos primários da variável linguística e na construção da base de regras. No entanto, algumas melhorias ainda podem ser feitas nos parâmetros do sistema de inferência *fuzzy*, principalmente no ajuste das funções de pertinência, através de técnicas como redes neurais artificiais ou algoritmos genéticos.

## References

- Arvanitidis, N. V. and Rosing, J. (1970). Composite Representation of a Multireservoir Hydroelectric Power System. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pages 319–326.
- Carneiro, A. A. F. M. and Kadowaki, M. (1996). Regras de operação para grandes sistemas hidroelétricos em cascata. In *Anais do 11o Congresso Brasileiro de Automática*.
- Carneiro, A. A. F. M., Soares, S., and Carvalho, M. F. H. (1988). Um modelo adaptativo para o planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de potência. In *Anais do 7o Congresso Brasileiro de Automática*, pages 823–829.
- Castro, R. (2004). *Análise de Decisões sob Incertezas para Investimentos e Comercialização de Energia Elétrica no Brasil*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas.
- Cruz Jr, G. C. and Soares, S. (1995). Nonuniform Composite Representation of Hydroelectric Systems for Long-term Hydrothermal Scheduling. In *1995 IEEE Power Industry Computer Application Conference, 1995. Conference Proceedings.*, pages 566–571.
- Cruz Jr, G. C. and Soares, S. (1999). General Composite Representation of Hydroelectric Systems. In *Power Industry Computer Applications, 1999. PICA'99. Proceedings of the 21st 1999 IEEE International Conference*, pages 177–182.
- Fortunato, L. A. M., Araripe Neto, T. A., Albuquerque, J. C. R., and Pereira, M. V. F. (1990). *Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica*. EDUFF Editora Universitária, Rio de Janeiro, RJ.
- Kadowaki, M. (1995). Simulação da Operação de Sistemas Hidroelétricos de Potência a Usinas Individualizadas com Regras Otimizadas. Master's thesis, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.

- Nakazawa, T. S., Sacchi, R., and Carneiro, A. A. F. M. (2006). Regras de operação de reservatórios para sistemas hidrotérmicos de potência com base em indicadores econômicos. *XXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*.
- Oliveira Júnior, H. A., Caldeira, A. M., Machado, M. A. S., and Tanscheit, R. (2007). *Inteligência Computacional Aplicada à Administração, Economia e Engenharia em Matlab*. Thomson Learning.
- Rabelo, R. A. L., Braga, R. T. V., and Carneiro, A. A. F. M. (2009). Component-based development applied to energetic operation planning of hydrothermal power systems. In *Proceedings of IEEE Bucharest PowerTech*.
- Rabelo, R. A. L., Lopes, W. N. M., Carneiro, A. A. F. M., and Braga, R. T. V. (2008). Análise, projeto e implementação orientado a objetos aplicados ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos de potência. *XVII Congresso Brasileiro de Automática*.
- Rezende, S. O. (2003). *Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações*. Ed. Manole.
- Ross, T. J. (2004). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Wiley.
- Sacchi, R., Carneiro, A. A. F. M., and Araújo, A. F. R. (2004a). Operation policies for hydropower systems: Using the unsupervised sonarx neural network. *IEEE - Power Systems Conference & Exposition*.
- Sacchi, R., Carneiro, A. A. F. M., and Araújo, A. F. R. (2004b). A rbf network trained by the sonarx model and applied to obtain the operation policies of the hydropower systems. In *8th Brazilian Symposium on Artificial Neural Networks*.
- Sacchi, R., Nazareno, J. S., Castro, M. A. A., Silva Filho, D., and Carneiro, A. A. F. M. (2004c). Economics principles of the hydrothermal power systems operation. In *IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning*.
- Shaw, I. S. and Simões, M. G. (1999). *Controle e modelagem fuzzy*. Edgard Blucher: FAPESP.
- Silva Filho, D. and Carneiro, A. A. F. M. (2004). Dimensionamento Evolutivo de Usinas Hidroelétricas. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática*, 15:437–448.
- Silva Filho, D., Carneiro, A. A. F. M., and Araújo, A. F. R. (1999). Redes RBF Aplicadas à Simulação da Operação de Usinas Hidroelétricas. In *IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais*, pages 275–280.
- Soares, S. and Carneiro, A. A. F. M. (1991). Optimal Operation of Reservoirs for Electric Generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6(3):1101–1107.
- Soares, S. and Carneiro, A. A. F. M. (1993). Reservoir Operation Rules for Hydroelectric Power System Optimization. In *Athens Power Tech, 1993. APT 93. Proceedings. Joint International Power Conference*, volume 2.
- Zimmermann, H. J. (2001). *Fuzzy Set Theory – and its Applications*. Kluwer Academic Publishers.