

UMA APLICAÇÃO DE SISTEMAS INTELIGENTES HÍBRIDOS *FUZZY*-PSO PARA A OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS EM SISTEMAS HIDROTÉRMICOS DE GERAÇÃO

Ricardo A. L. Rabêlo, Ricardo A. S. Fernandes e Ivan N. da Silva

Universidade de São Paulo (USP)

ricardo_usp@yahoo.com.br, ricardo.asf@gmail.com, insilva@sc.usp.br

Resumo – Este trabalho propõe a implementação de regras de operação de reservatórios (RORs) por meio de uma abordagem híbrida baseada em Sistemas *Fuzzy* e Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO). Sistemas de inferência *fuzzy* de Mamdani são empregados para estimar o volume operativo de cada usina hidroelétrica, baseado no valor da energia armazenada no sistema hidroelétrico. Para isto, especializa-se um sistema *fuzzy* para cada usina hidroelétrica, de forma a representar o comportamento diferenciado de cada reservatório na operação otimizada do sistema. Otimização por Enxame de Partículas é utilizada para ajustar as funções de pertinência da variável linguística do consequente das regras de produção dos sistemas *fuzzy*. Um modelo computacional de simulação da operação de sistemas hidroelétricos é empregado para aplicar e comparar as RORs propostas, baseadas em sistemas *fuzzy* e PSO (ROR-SFPSO), com a regra de operação paralela (ROR-P), muito utilizada na prática, inclusive em modelos do setor elétrico brasileiro, com a regra de operação baseada em funções matemáticas (ROR-FM) e com a regra de operação baseada em sistemas *fuzzy* Takagi-Sugeno (ROR-SFTS). Os resultados obtidos ilustram a eficiência da ROR-SFPSO, a qual maximiza os benefícios hidroelétricos do sistema hidrotérmico de geração, quando comparada às outras RORs implementadas.

Palavras-chave – Sistemas *Fuzzy*, Otimização por Enxame de Partículas, Regras de Operação de Reservatórios e Usina Hidroelétrica.

Abstract – This paper proposes to implement Reservoir Operation Rules (ROR) through a hybrid approach based on Fuzzy Systems and Particle Swarm Optimization (PSO). Thus, fuzzy inference systems of Mamdani are used to estimate the operating volume of each hydroelectric plant, based on the value of the stored energy in the hydroelectric system. In order to represent the different behavior of each reservoir in optimal system operation, a different fuzzy system for each hydroelectric plant was specialized. On the other hand, the PSO algorithm is used to adjust the membership functions that represent the consequent of linguistic rules of fuzzy system. A computational model for simulating the operation of hydroelectric systems is used to implement the proposed ROR, based on developed Fuzzy-PSO (ROR-FPSO) systems, and to compare them to the Parallel Operation rule (ROR-PO), to the operation rule based on Mathematical Functions (ROR-MF) and to the operation rule based on Takagi-Sugeno Fuzzy Systems (ROR-TSFS). The results illustrate the effectiveness of ROR-FPSO, which maximizes the benefits of hydroelectric generation of the hydrothermal system, when compared to other ROR already found in literature.

Keywords – Fuzzy Systems, Particle Swarm Optimization, Reservoir Operation Rules and Hydroelectric Plant.

1 Introdução

O planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos pretende especificar como o conjunto de usinas deve ser operado de modo que os recursos disponíveis para geração de energia elétrica sejam utilizados de forma eficaz e eficiente. Em sistemas hidrotérmicos com grande participação de geração hidroelétrica, como é o caso do sistema brasileiro, o planejamento da operação visa estabelecer regras de operação para os reservatórios (RORs) de forma a substituir, na medida do possível, a geração de origem termoeletrica por geração de origem hidroelétrica [1].

As regras de operação dos reservatórios encontram-se presentes em várias etapas do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos. As RORs são necessárias para a obtenção do reservatório equivalente de energia [2], para a desagregação das metas de geração hidráulica do reservatório equivalente [3], e para a avaliação do desempenho do sistema hidroelétrico em diversas condições [4]. Uma regra de operação muito adotada na prática, inclusive em modelos computacionais do setor elétrico brasileiro, conhecida como regra de operação em paralelo (ROR-P) [5], determina que todos os reservatórios do sistema hidroelétrico devem permanecer com a mesma porcentagem de seus volumes úteis. Esta regra tem como maior atrativo sua simplicidade, entretanto, ela não obedece aos princípios da operação otimizada dos reservatórios para a geração de energia elétrica [6].

Este trabalho utiliza sistemas de inferência *fuzzy* para determinar a regra de operação de cada reservatório, ou seja, estimar o volume operativo das usinas hidroelétricas, utilizando como parâmetro de entrada o valor da energia armazenada no sistema. Neste trabalho, empregou-se um sistema de inferência *fuzzy* de Mamdani, pois procurou-se modelar o raciocínio aproximado [7],

de forma a imitar a habilidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente com imprecisões, incertezas e ruídos. Outro modelo *fuzzy* com ampla utilização é o sistema de inferência *fuzzy* Takagi-Sugeno [8]. Este modelo foi proposto como um esforço para desenvolver uma abordagem sistemática para gerar regras de produção *fuzzy* a partir de um conjunto de dados de entrada e saída [9]. As regras *fuzzy* em um sistema de inferência *fuzzy* Takagi-Sugeno possuem variáveis linguísticas somente em seus antecedentes, e a definição dos seus consequentes, geralmente baseada no método dos mínimos quadrados, requer dados numéricos. Já as regras de produção em um modelo de inferência de Mamdani possuem variáveis linguísticas tanto em seus antecedentes como em seus consequentes. Portanto, a base de regras no modelo *fuzzy* de Mamdani pode ser definida exclusivamente de forma linguística, sem a necessidade de dados numéricos de entrada/saída. Entretanto, a necessidade de ajustes nas funções de pertinência das variáveis linguísticas de saída requer um esforço adicional por parte do projetista no desenvolvimento do sistema.

Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO) [10] é utilizada para encontrar o ajuste otimizado das funções de pertinência associadas a variável linguística de saída (consequente) das regras de produção *fuzzy*. Importante ressaltar que PSO supera muitas das limitações encontradas nos métodos de busca/otimização tradicionais e tem se mostrado eficiente em uma grande variedade de problemas. Diferentemente de outras técnicas heurísticas, PSO tem mecanismos flexíveis e bem balanceados para realçar as habilidades de exploração global e local do espaço de busca [11].

2 Regras de Operação de Reservatórios

As regras de operação são funções que determinam o volume operativo de cada reservatório para estabelecer um comportamento acoplado entre as usinas hidroelétricas. Para implementar o acoplamento na operação do conjunto de usinas hidroelétricas, define-se um parâmetro global, denominado fator de acoplamento da operação do sistema hidroelétrico, denotado por λ_t . O fator de acoplamento representa o percentual de armazenamento do sistema em um determinado intervalo t , e é calculado (Equação 1) como a proporção entre a energia armazenada no sistema (EAS_t) e a máxima energia possível de ser armazenada no sistema (EAS^{max}), resultando nos valores no intervalo $0 \leq \lambda_t \leq 1$.

$$\lambda_t = \frac{EAS_t}{EAS^{max}} \quad (1)$$

Com o valor de λ , o volume de cada usina a reservatório pode ser determinado pela seguinte equação:

$$x_{i,t}(\lambda_t) = x_{i,t}^{min} + f_i(\lambda_t) \cdot (x_{i,t}^{max} - x_{i,t}^{min}) \quad (2)$$

onde:

- $f_i(\lambda_t)$: regra de operação do reservatório da usina i em função do parâmetro λ_t . Ela expressa o comportamento operativo (esvaziamento/enchimento) do reservatório em conjunto com os outros reservatórios do sistema hidroelétrico;
- $x_{i,t}^{min}$: volume mínimo operativo da usina i no intervalo t ;
- $x_{i,t}^{max}$: volume máximo operativo da usina i no intervalo t ;
- $x_{i,t}$: volume operativo da usina i no intervalo t ;

3 Sistema Fuzzy - PSO

3.1 Aspectos da Implementação do Sistema Fuzzy-PSO

Os sistemas de inferência *fuzzy* implementados têm uma variável linguística de entrada, a energia armazenada no sistema (EAS_L), definida no conjunto de termos linguísticos (Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta)(Figura 1) e uma variável linguística de saída, o volume útil, também definida no conjunto de termos linguísticos (Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto).

Neste trabalho, especializou-se para cada uma das 7 usinas (Figura 5), um sistema de inferência *fuzzy* de Mamdani, composto por 5 regras disjuntivas de inferência. A sintaxe da base de regras dos sistemas *fuzzy* implementados está representada pelas seguintes declarações condicionais linguísticas:

- Regra 1: Se (EAS_L é *Muito Baixa*) Então (*Volume Útil é Muito Baixo*), ou
- Regra 2: Se (EAS_L é *Baixa*) Então (*Volume Útil é Baixo*), ou
- Regra 3: Se (EAS_L é *Média*) Então (*Volume Útil é Médio*), ou
- Regra 4: Se (EAS_L é *Alta*) Então (*Volume Útil é Alto*), ou
- Regra 5: Se (EAS_L é *Muito Alta*) Então (*Volume Útil é Muito Alto*)

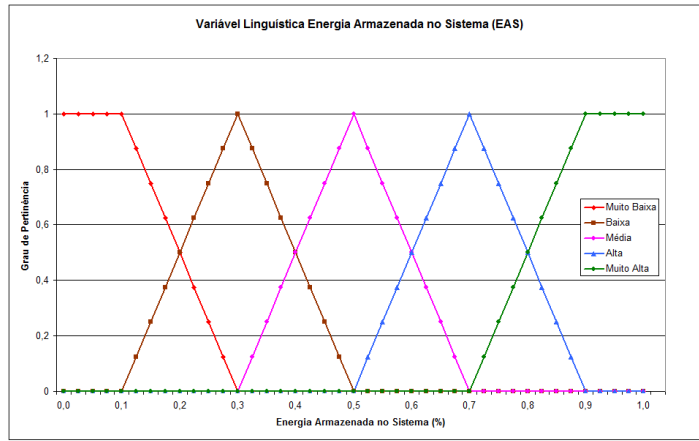


Figura 1: Variável linguística de entrada representando a energia armazenada no sistema.

PSO foi empregada para ajustar as funções de pertinência associadas à variável linguística Volume Útil em cada um dos 7 sistemas *fuzzy*. O ajuste diferenciado na variável linguística de saída é feito de forma a representar o comportamento diferenciado de cada reservatório na operação otimizada do sistema. O primeiro passo na utilização do PSO consiste em representar as partículas, isto é, os parâmetros do problema. Neste trabalho, consideram-se como parâmetros as funções de pertinência das variáveis linguísticas de saída.

As funções de pertinência utilizadas para as variáveis linguísticas são triangulares (Figura 2).

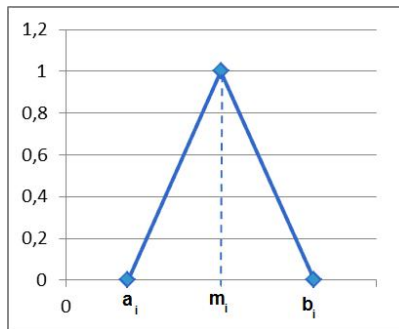


Figura 2: Função de pertinência triangular.

Entretanto, ao invés das partículas armazenarem os valores a_i , m_i e b_i para cada função de pertinência, elas armazenam os coeficientes de ajustes (parâmetros) δ_i e η_i . Cada função de pertinência i pode ser montada a partir das seguintes equações [12]:

- $a_i = (a_i + \delta_i) - \eta_i$;
- $m_i = (m_i + \delta_i)$;
- $b_i = (b_i + \delta_i) + \eta_i$.

O coeficiente δ_i é responsável por deslocar a função de pertinência para a direita ou esquerda, enquanto o coeficiente η_i pode expandir ou encolher o suporte [13] da função da pertinência em relação ao seu universo de discurso. Como cada variável linguística possui no máximo 5 termos primários, e cada função de pertinência associada a um termo primário é representada pelos dois parâmetros δ_i e η_i , são necessários 10 parâmetros para representar as funções de pertinência de uma variável linguística do sistema de inferência *fuzzy* aplicado. Portanto, para representar os 7 sistemas de inferência *fuzzy* são necessários 70 parâmetros, caracterizando o espaço de busca do problema como de dimensão 70.

A função de avaliação é responsável por medir a qualidade de cada partícula do enxame como solução potencial do problema. Neste trabalho empregou-se como função de avaliação a soma dos déficits de energia armazenada no sistema durante o horizonte de planejamento para as simulações da operação com a ROR-SFPSO. O déficit de energia armazenada no sistema é calculado como a subtração entre o valor obtido da energia armazenada através da solução otimizada (limite superior de desempenho no uso dos recursos hidroelétricos de geração), e os valores da energia armazenada resultantes da simulação com a aplicação da ROR-SFPSO. Numericamente, a função de avaliação é representada por (3), onde T representa o número de intervalos do horizonte de planejamento:

Parâmetros	
Np	30
t_{max}	100
c_1	2.0
c_2	2.0
w_{min}	0,40
w_{max}	0,90
v_{max}	$20\% \cdot (x_{max} - x_{min})$

Tabela 1: Valores para os principais parâmetros do algoritmo PSO implementado.

$$\text{função de avaliação} = \sum_{i=1}^T (EAS_t^{otim} - EAS_t^{Sim}) \quad (3)$$

O algoritmo do PSO tem um grupo de parâmetros que precisa ser estabelecido. Um dos primeiros parâmetros para ajuste é o número de partículas do enxame, ou seja, o tamanho da população. Em nossa aplicação, a população (Np) foi definida considerando-se 30 partículas. Verificou-se que 30 partículas garantiam o bom desempenho do algoritmo, bem como um esforço computacional aceitável. O critério de parada adotado consiste em parar a execução do algoritmo caso o número máximo de iterações (t_{max}) seja excedido. O número máximo de gerações (iteraões) foi considerado igual a 100. Os valores adotados para os coeficientes de aceleração foram 2.0 tanto para o componente cognitivo (c_1) como para o componente social (c_2). Deve ser mencionado que a atribuição dos valores para os coeficientes de aceleração também segue as várias aplicações práticas de PSO. Para o algoritmo implementado, adotou-se 0,40 e 0,90 como limites inferior (w_{min}) e superior (w_{max}), respectivamente para o peso de inércia. Adotou-se o limite máximo da velocidade da partícula (v_k^{max}) correspondente a 20% da amplitude máxima em cada dimensão.

A Tabela 1 resume os valores dos parâmetros utilizados na implementação do algoritmo de PSO:

Após o ajuste de todos os sistemas *fuzzy*, eles podem realizar inferências, a partir de valores numéricos da variável de entrada (λ_t), para obter o valor da variável de saída, o volume operativo dos reservatórios no intervalo t . A inferência de cada regra consiste na avaliação do antecedente, seguida da aplicação do operador de implicação para determinar o conjunto *fuzzy* do consequente. A agregação dos consequentes consiste em agregar, ou combinar, os consequentes obtidos pela inferência de cada regra. O procedimento de *defuzzificação* obtém o valor numérico do volume operativo útil de cada uma das usinas do sistema hidroelétrico. O operador de implicação utilizado foi o operador mínimo de Mamdani, a agregação dos consequentes foi realizada pelo operador máximo, e o método de *defuzzificação* empregado foi o método do centro de área [13]. Como resultado da operação do PSO no ajuste dos sistemas *fuzzy*, as Figuras 3 e 4 exibem as funções de pertinência associadas à variável linguística volume útil das usinas de Furnas e Marimbondo.

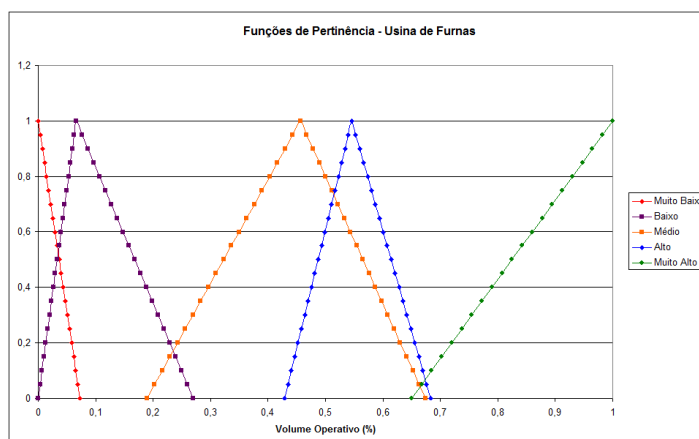


Figura 3: Variável linguística de saída representando o volume útil da usina de Furnas.

4 Aplicações e Discussões

A simulação da operação propõe verificar o comportamento operativo de um sistema hidroelétrico sujeito a determinadas condições de operação (mercado de energia elétrica, regras de operação, vazões afluentes, restrições operativas, volume inicial, etc.). Assim, para efetuar a comparação entre as RORs propostas, baseadas em sistemas *fuzzy* e PSO (ROR-SFPSO), elas foram

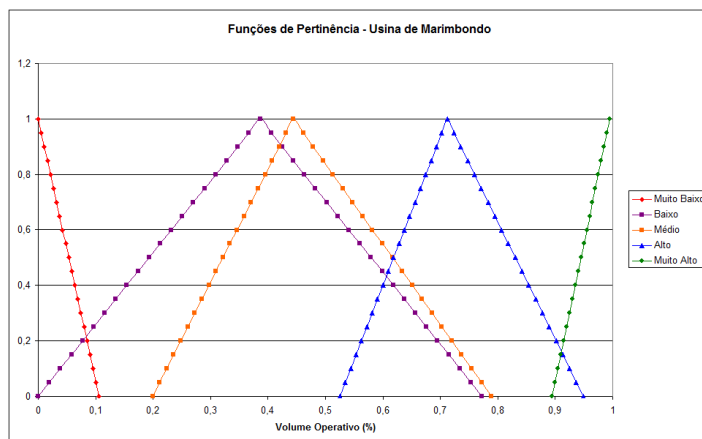


Figura 4: Variável linguística de saída representando o volume útil da usina de Marimbondo.

aplicadas e comparadas, por meio da simulação da operação de sistemas hidroelétricos, com a regra de operação paralela (ROR-P), muito utilizada na prática, inclusive em modelos do setor elétrico brasileiro, com a regra de operação baseada em funções matemáticas (ROR-FM) [3] e com a regra de operação baseada em sistemas *fuzzy* Takagi-Sugeno (ROR-SFTS) [14]. Ressalta-se que as simulações da operação são realizadas considerando as mesmas condições de operação. Portanto, as diferenças de comportamento na operação do sistema hidroelétrico resultarão unicamente das regras operacionais utilizadas.

4.1 Condições de Operação

Foram realizados 5 estudos de caso, considerando as vazões afluentes das usinas para alguns períodos do histórico (1936 a 1941; 1951 a 1956; 1971 a 1976; 2000 a 2005) e com dados da MLT (Média de Longo Termo), com o intuito de realizar uma comparação entre as RORs implementadas no modelo de simulação, sob diversas condições hidrológicas. Considerou-se, em todos os estudos de caso, o volume inicial armazenado nos reservatórios, como sendo igual ao volume máximo operativo.

4.2 Sistema Hidroelétrico Utilizado

A Figura 5 ilustra o conjunto de usinas hidroelétricas utilizado neste trabalho. O conjunto de usinas escolhido forma um sistema complexo, pois contém usinas de grande porte, interligadas em paralelo e em cascata. Vale comentar que a representação das usinas hidroelétricas é feita de forma individualizada.

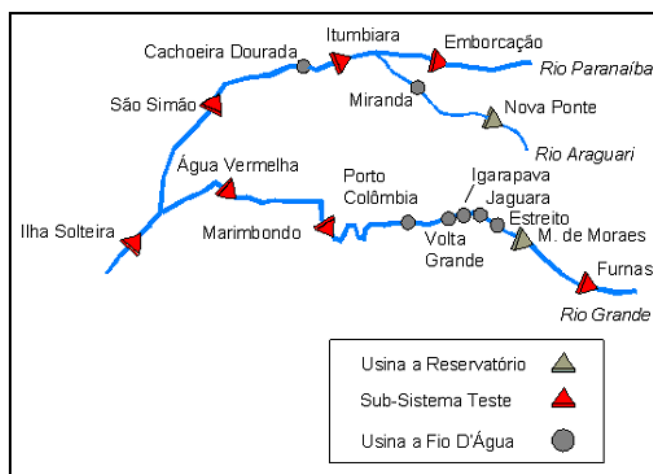


Figura 5: Sistema hidroelétrico utilizado.

4.3 Horizonte de Planejamento

Neste trabalho, adotou-se o planejamento da operação com horizontes de cinco anos, discretizados mensalmente, o que implica em um horizonte composto por 60 intervalos.

4.4 Modelos Computacionais de Otimização e de Simulação

Neste trabalho, empregou-se um modelo computacional para otimização e simulação da operação de sistemas hidroelétricos. O modelo de otimização é utilizado para a determinação da operação otimizada dos reservatórios e é inspirado em algoritmos de otimização especificamente projetados para o planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos [15, 16]. O modelo de simulação inclui um algoritmo de simulação que permite a avaliação do desempenho das regras de operação de reservatórios. Os algoritmos de simulação buscam reproduzir o comportamento operativo das usinas do sistema hidroelétrico sob determinadas condições operativas. Vale ressaltar que os modelos computacionais utilizados são parte de uma ferramenta computacional que vem sendo desenvolvida pelos autores para a realização de estudos relacionados ao planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos [17].

4.5 Resultados

O resultado ilustrado pela Figura 6 evidencia as oscilações dos volumes dos reservatórios em função da localização da usina na cascata através da aplicação das RORs-SFPSO. Com a influência predominante do efeito cota [18], a usina de Furnas, situada a montante do Rio Grande, apresentou níveis mais acentuados de oscilações em seu reservatório, fazendo com que seu reservatório seja operado com níveis inferiores quando comparado às outras usinas da cascata, como Marimbondo e Ilha Solteira. A usina de Ilha Solteira é operada com seu reservatório cheio durante a maior parte do horizonte de planejamento. Como a energia armazenada em um sistema é valorizada pela produtividade das usinas mais a jusante, a usina de Ilha Solteira comporta-se como uma usina a fio d'água e valoriza toda a água do sistema hidroelétrico, de forma a ser operada com produtividade máxima. A usina de Marimbondo, com localização intermediária na cascata, possui oscilações mais suaves no armazenamento em seu reservatório do que a usina de Furnas, entretanto apresenta oscilações mais severas quando comparada a usina de Ilha Solteira. Desta forma a aplicação das ROR-SFPSO enfatizou o enchimento dos reservatórios de jusante para montante, e o esvaziamento dos reservatórios de montante para jusante.

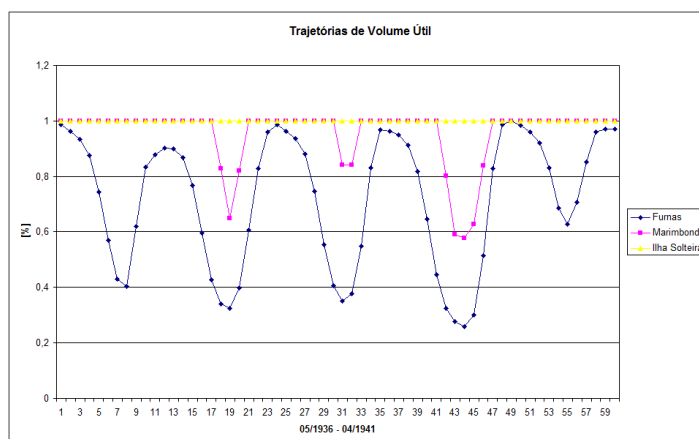


Figura 6: Trajetórias de volume nos reservatórios de algumas usinas do sistema (1936 a 1941).

As regras de operação baseadas na implementação de Sistemas *Fuzzy*-PSO têm estabelecido um perfil especializado para o conjunto de reservatórios, de forma a maximizar a energia armazenada no sistema hidroelétrico. Esse comportamento diferenciado é obtido por meio de ajustes distintos na variável linguística de saída em cada um dos 7 sistemas de inferência *fuzzy*. Os resultados apresentados pelas Figuras 7 e 8 ilustram a maior eficiência na utilização dos recursos hidroelétricos de geração pelas RORs-SFPSO quando comparada à ROR-P, à ROR-FM e à ROR-SFTS. Pode-se perceber um esvaziamento mais severo do conjunto dos reservatórios ao se utilizar as outras RORs, o que implica uma melhor utilização da água dos reservatórios pela ROR-SFPSO. Pode-se frisar ainda que, durante todo o horizonte de planejamento, a ROR-SFPSO sempre apresentou valores mais altos de energia armazenada no sistema, confirmando que esta regra de operação utiliza menos água para atender ao mesmo mercado de energia elétrica (meta de geração hidráulica). Adicionalmente, ao final do horizonte de planejamento, pode-se visualizar que as demais RORs não conseguem alcançar os níveis de armazenamento obtidos pela ROR-SFPSO, fazendo com que a confiabilidade e o custo da operação estejam extremamente comprometidos na operação contínua do sistema. Portanto, a ROR-SFPSO facilita a continuidade da operação, visto que o sistema hidroelétrico não deixa de ser operado com o final do horizonte de planejamento.

Desta forma, pode-se verificar que a ROR-SFPSO pode assegurar um fornecimento mais confiável e econômico da energia elétrica. Econômico porque ela necessita de menos recursos hidráulicos de geração que as outras RORs. Confiável porque ela permite a operação do sistema hidroelétrico com níveis superiores de armazenamento nos reservatórios, diminuindo a possibilidade de déficits hidráulicos do sistema hidrotérmico de geração. Portanto, pode-se evidenciar a potencialidade da ROR-SFPSO na utilização otimizada dos recursos hidráulicos, voltados para a geração de energia elétrica. Além do mais, a ROR-SFPSO é bastante condizente com os objetivos do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos, pois a otimização dos recursos

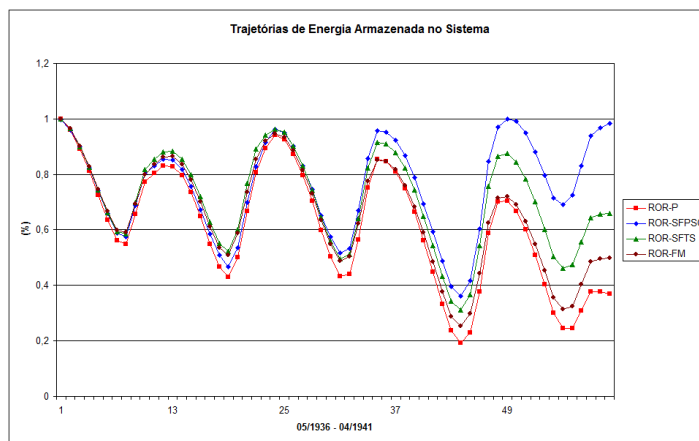


Figura 7: Trajetória de energia armazenada no sistema (1936 a 1941).

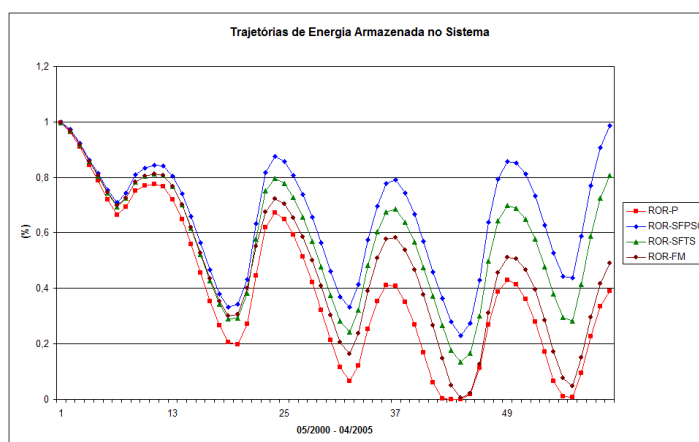


Figura 8: Trajetória de energia armazenada no sistema (2000 a 2005).

hidráulicos visa minimizar a geração complementar. Dessa forma, quanto maior for o desempenho da regra de operação dos reservatórios na utilização dos recursos hidroelétricos de geração, menor será a quantidade de geração complementar necessária para atender ao mercado de energia elétrica.

A Tabela 2 apresenta a média da energia armazenada no sistema durante o horizonte de planejamento para as simulações da operação com a aplicação de cada ROR. De forma a verificar a eficácia das regras de operação baseadas em sistemas *fuzzy*-PSO, a Tabela também apresenta a média da energia armazenada no sistema obtida quando emprega-se o modelo de otimização implementado. Ressalta-se que a solução obtida através do modelo de otimização corresponde ao limite superior de desempenho no uso dos recursos hidroelétricos de geração.

5 Conclusões

Este trabalho enfatizou a especificação de regras de operação de reservatórios por meio de Sistemas *Fuzzy*-PSO. Sistemas de inferência *fuzzy* de Mamdani foram empregados para estimar o volume operativo de cada usina hidroelétrica, a partir do valor da energia armazenada no sistema hidroelétrico. Para isto, atribuiu-se um sistema *fuzzy* para cada usina hidroelétrica, de

Tabela 2: Média da Energia Armazenada no Sistema Hidroelétrico [MW].

Hor. de Planejamento	ROR-P	ROR-FM	ROR-SFTS	ROR-SFPSO	Sol. Otimizada
1936-1941	27865, 83	29773, 74	32299, 55	34563, 29	34824, 86
1951-1956	24232, 82	26817, 27	28851, 86	38301, 81	38375, 47
1971-1976	14329, 13	27517, 44	26544, 69	33440, 96	33470, 54
2000-2005	18151, 44	21761, 86	25847, 11	29712, 18	29761, 31
MLT	17171, 52	25950, 09	27437, 61	34968, 45	34991, 9

forma a representar o comportamento diferenciado de cada reservatório na operação otimizada do sistema. PSO foi aplicada para sintonizar as funções de pertinência da variável linguística do consequente das regras de produção dos 7 sistemas *fuzzy*.

Os resultados evidenciaram a eficiência da regra proposta quando utilizada na simulação da operação de sistemas hidroelétricos. Com relação à energia armazenada no sistema, os testes ilustraram que a regra de operação proposta necessita de menos recursos hidráulicos sob as mesmas condições de operação que as outras regras implementadas. Com a regra de operação baseada em Sistemas *Fuzzy*-PSO, as usinas de jusante, sempre que possível, permaneceram cheias, de forma a manter alta produtividade e valorizar a água que passa por elas. Desse modo, as funções de pertinência dos consequentes dos sistemas de inferência *fuzzy* priorizam níveis cada vez mais elevados de armazenamento nos reservatórios de montante para jusante na cascata de usinas. Com a especialização de um sistema de inferência *fuzzy* para cada usina a reservatório, a operação de cada usina reflete o papel que ela possui no sistema hidroelétrico, de acordo com sua localização na cascata. Por isto, o sistema hidroelétrico é capaz de manter níveis mais elevados de energia armazenada. Pode-se afirmar que a simulação da operação utilizando a ROR- SFPSO maximiza os benefícios hidroelétricos do sistema hidrotérmico de geração, pois atende ao mesmo mercado de energia elétrica, utilizando menos recursos hidroelétricos. Ressalta-se que ao final do horizonte de planejamento, a ROR-P, a ROR-FM e a ROR-SFTS não conseguem manter os níveis de armazenamento dos reservatórios do sistema próximos dos níveis de armazenamento estabelecidos pela ROR-SFPSO, implicando que a confiabilidade e o custo da geração do sistema hidrotérmico vão estar extremamente comprometidos na operação futura do sistema.

Ao optar-se por um sistema de inferência *fuzzy* de Mamdani para determinar as regras de operação das usinas do sistema hidroelétrico, obtém-se uma estratégia de ação/controlar que pode ser monitorada e interpretada do ponto de vista linguístico. Como os sistemas de inferência *fuzzy* são potencialmente capazes de expressar e manipular informações qualitativas, outra vantagem na aplicação dos sistemas *fuzzy* de Mamdani deve-se ao fato dos especialistas de domínio poderem mapear a sua experiência e o seu processo de tomada de decisões, de forma qualitativa. Desta forma, a estratégia de ação/controlar do sistema de inferência *fuzzy* de Mamdani pode ser considerada tão fundamentada e consistente quanto a estratégia dos especialistas de domínio.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Christoforidis, M. Aganagic, B. Awobamise, S. Tong and A. Rahimi. "Long-term/mid-term Resource Optimization of a Hydrodominant Power System using Interior Point Method". *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 287–294, 1996.
- [2] N. V. Arvanitidis and J. Rosing. "Composite Representation of a Multireservoir Hydroelectric Power System". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 2, pp. 319–326, 1970.
- [3] S. Soares and A. A. F. M. Carneiro. "Reservoir Operation Rules for Hydroelectric Power System Optimization". In *Athens Power Tech, 1993. APT 93. Proceedings. Joint International Power Conference*, volume 2, 1993.
- [4] J. A. Gonzalez. "Probabilistic Production Costing Modeled With AMPL". *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 2, 2002.
- [5] T. C. Marques, M. A. Cicogna and S. Soares. "Assessment of Energy Availability of Hydro System Under Different Operation Policies". *Proceedings of IEEE Power Tech*, 2005.
- [6] S. Soares and A. A. F. M. Carneiro. "Optimal Operation of Reservoirs for Electric Generation". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 3, pp. 1101–1107, 1991.
- [7] E. H. Mamdani. "Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis". *IEEE Transactions on Computers*, vol. 26, no. 12, pp. 1182–1191, 1977.
- [8] T. Takagi and M. Sugeno. "Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control". *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 15, pp. 116–132, 1985.
- [9] J. M. Mendel. *Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions*. Prentice Hall, 2001.
- [10] J. Kennedy, R. Eberhart *et al.*. "Particle Swarm Optimization". In *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, volume 4, pp. 1942–1948. Perth, Australia, 1995.
- [11] Y. Shi and R. Eberhart. "A Modified Particle Swarm Optimizer". In *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence*, pp. 69–73. IEEE, 2002.
- [12] D. Park, A. Kandel and G. Langholz. "Genetic-based New Fuzzy Reasoning Models with Application to Fuzzy Control". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 24, no. 1, pp. 39–47, 1994.
- [13] H. J. Zimmermann. *Fuzzy Set Theory – and its Applications*. Kluwer Academic Publishers, 2001.

- [14] R. A. L. Rabelo, A. A. F. M. Carneiro and R. T. V. Braga. “An Energetic Operation Policy Using Fuzzy Controllers for Maximization of Benefits in the Brazilian Hydrothermal Power System”. In *Proceedings of IEEE Bucharest PowerTech*, 2009.
- [15] M. F. Carvalho and S. Soares. “An Efficient Hydrothermal Scheduling Algorithm”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 537–542, 1987.
- [16] A. A. F. M. Carneiro, S. Soares and P. S. Bond. “A Large Scale of an Optimal Deterministic Hydrothermal Scheduling Algorithm”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 204–211, 1990.
- [17] R. A. L. Rabelo, A. A. F. M. Carneiro and R. T. V. Braga. “Component-Based Development Applied to Energetic Operation Planning of Hydrothermal Power Systems”. In *Proceedings of IEEE Bucharest PowerTech*, 2009.
- [18] E. G. Read. “Economic Principles of Reservoir Operation I: Perfect Foresight”. *CBER Working Paper, College of Business Administration, University of Tennessee*, 1982.