

UMA APLICAÇÃO DE SISTEMAS *FUZZY* GENÉTICOS PARA O PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS

Ricardo A. L. Rabêlo

Unidade de Tecnologia e Segurança da Informação (UNITEC) / SEFAZ-PI
{ricardor_usp}@yahoo.com.br

Fábbio A. S. Borges

Centro de Ensino Unificado de Teresina (CEUT)
{fabbioanderson}@gmail.com

Ricardo A. S. Fernandes

Universidade de São Paulo (USP)
{ricardo.asf}@gmail.com

Resumo – Este trabalho propõe a implementação de regras de operação de reservatórios por meio de Sistemas *Fuzzy* Genéticos. Sistemas de inferência *fuzzy* de Mamdani são empregados para estimar o volume operativo de cada usina hidroelétrica, a partir do 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. Algoritmos Genéticos são utilizados para sintonizar as funções de pertinência da variável linguística do consequente das regras de produção dos sistemas *fuzzy*. A regra de operação de reservatório proposta, baseada em sistemas *fuzzy* genéticos (ROBSFG), foi aplicada e comparada, por meio da simulação da operação energética de sistemas hidroelétricos, com a regra de operação paralela (ROP), muito utilizada na prática inclusive em modelos do setor elétrico brasileiro, a regra de operação baseada em funções matemáticas (ROBFM) e a regra de operação baseada em sistemas *fuzzy* Takagi-Sugeno (ROSFTS). Os resultados obtidos ilustram a eficiência da regra proposta, a qual maximiza os benefícios hidroelétricos do sistema hidrotérmico de geração.

Palavras-chave – Sistemas de Inferência *Fuzzy*, Algoritmos Genéticos, Sistemas *Fuzzy* Genéticos, Planejamento da Operação, Regras de Operação e Sistemas Hidrotérmicos.

1 Introdução

O planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos consiste em especificar como o conjunto de usinas hidroelétricas e termoelétricas deve ser operado para que os recursos disponíveis para geração de energia elétrica sejam utilizados de forma 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 de forma a substituir, na medida do possível, a geração de origem termoelétrica por geração de origem hidroelétrica [1,2]. Devido às suas características peculiares, o planejamento da operação do sistema hidrotérmico brasileiro pode ser classificado como um problema acoplado no tempo e no espaço, não linear, não convexo, estocástico e de grande porte [3–8].

As regras de operação encontram-se presentes em várias etapas do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos. As regras são necessárias no procedimento de agregação para obtenção do reservatório equivalente de energia [9–11], assim como, na simulação da operação para a desagregação das metas de geração hidráulica total entre todas as usinas [12]. Elas também são importantes no estudo do desempenho do sistema hidrotérmico, por meio de simulações da operação, pois os modelos de simulação permitem que a operação seja reproduzida em condições muito próximas à real, possibilitando a avaliação do sistema em diversas condições [13, 14]. Uma regra de operação muito adotada na prática, conhecida como regra de operação em paralelo [15], 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 [16–21]. Diferentes posições relativas dentro das cascatas e diferentes características construtivas (altura de queda líquida, capacidade de armazenamento da água, produtividade da usina, etc.) são características peculiares de cada usina hidroelétrica. Baseado nisso, fica praticamente inviável desenvolver regras de operação genéricas para todos os reservatórios do sistema hidroelétrico [22].

Para obter regras de operação que representem o comportamento otimizado dos reservatórios, inicialmente, a operação do sistema hidroelétrico é otimizada sob as mais diversas situações que podem ser encontradas na prática. Com a otimização, obtém-se um conjunto de pontos de operação, que relacionam a energia armazenada no sistema hidroelétrico com o estado de

armazenamento de cada reservatório. Para que o conjunto de pontos possa ser utilizado como indicativo para uma regra de operação de uma determinada usina hidroelétrica, faz-se necessário o ajuste de funções matemáticas. Com estes ajustes, tem-se uma função que representa a regra de operação de cada usina hidroelétrica. Entretanto, a dispersão encontrada nos pontos tem implicado que as regras de operação obtidas nos vários trabalhos [12, 23–27] subestimam a capacidade de geração dos sistemas hidroelétricos utilizados.

De forma a eliminar a dependência e os problemas decorrentes da utilização dos pontos obtidos com a otimização da operação, este trabalho pretende utilizar alguns princípios que regem o comportamento otimizado dos reservatórios de forma a auxiliar a implementação de regras de operação para sistemas hidroelétricos. Por exemplo, um importante princípio da operação otimizada refere-se ao posicionamento relativo dos reservatórios na cascata de usinas hidroelétricas. Verifica-se que os reservatórios de montante apresentam maiores variações de volume durante o horizonte de planejamento. Nestas usinas, o volume de água em seus reservatórios é reduzido assim que a energia armazenada no sistema diminui. As usinas mais a jusante praticamente não exibem oscilações no volume armazenado em seus reservatórios, de forma a serem operadas como usinas a fio d'água. Desta forma, estas usinas mantêm seus reservatórios cheios, e só reduzem o volume quando a energia armazenada no sistema é crítica. Já as usinas intermediárias apresentam variações mais suaves, nem tão severas como nos reservatórios de montante, nem tão suaves como nos reservatórios de jusante. Este trabalho visa substituir a obtenção de regras de operação por meio de aproximações funcionais dos pontos representativos da operação otimizada, pelo conhecimento heurístico do relacionamento entre o estado de armazenamento global do sistema hidroelétrico (energia armazenada no sistema) e o volume operativo de cada usina hidroelétrica. Para isso, propõe-se a implementação de sistemas de inferência *fuzzy* de Mamdani [28] para fornecer as regras de operação de reservatórios. Neste trabalho, empregou-se um sistema de inferência *fuzzy* de Mamdani, pois procurou-se modelar, por meio de regras linguísticas, o raciocínio aproximado [29], de forma a imitar a habilidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente de imprecisões, incertezas e ruídos. Isto porque, sistemas de inferência *fuzzy* são potencialmente capazes de expressar e processar informações imprecisas, incertas, mal definidas e vagas. Outra vantagem na aplicação de sistemas de inferência *fuzzy* deve-se ao fato dos operadores humanos (especialistas) poderem mapear, de forma consistente, e em termos de regras linguísticas, o seu processo de tomada de decisões, fazendo com que a ação do sistema de inferência seja tão fundamentada e consistente quanto a deles.

No projeto de um sistema de inferência *fuzzy*, constitui-se aspecto relevante e fundamental a definição da base de conhecimento *fuzzy*, a qual é formada pela base de dados *fuzzy* e pela base de regras *fuzzy*. A base de dados *fuzzy* é composta principalmente pelas variáveis linguísticas [30] e seus termos primários, os quais são definidos por funções de pertinência (conjuntos *fuzzy*) [31]. A especificação da base de dados *fuzzy* normalmente é feita de forma manual. Entretanto, quanto maior o número de funções de pertinência associadas às variáveis linguísticas, maior a dificuldade em se estabelecer uma base de regras consistente. Assim, um aspecto relevante, passa a ser a definição dos conjuntos *fuzzy* correspondentes às variáveis de entrada (antecedentes) e às de saída (consequentes), porque o desempenho do sistema de inferência, quando colocado em operação, irá depender do número, da forma e da distribuição dos conjuntos *fuzzy* em relação ao universo de discurso (domínio). Adicionalmente, um sistema de inferência *fuzzy* terá um bom desempenho se a base de regras de produção *fuzzy*, a qual define a estratégia de tomada de decisão, for consistente. Vale ressaltar que alguns estudos têm mostrado que a performance do sistema de inferência *fuzzy* é muito mais sensível à escolha da base de dados *fuzzy* do que à composição da base de regras de produção *fuzzy* [32–35].

A metodologia proposta neste trabalho para a especificação de regras de operação de reservatórios combina sistemas de inferência *fuzzy* de Mamdani e Algoritmos Genéticos (AGs) [36]. Sistemas de inferência *fuzzy* de Mamdani são utilizados para estimar o volume operativo de cada usina hidroelétrica, a partir do valor da energia armazenada no sistema hidroelétrico. 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 nestes sistemas de inferência 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. Para este fim, Algoritmos Genéticos são utilizados para encontrar o ajuste otimizado das funções de pertinência associadas a cada termo primário do consequente das regras de produção *fuzzy*. Importante ressaltar que os AGs são algoritmos de otimização global, baseados nos mecanismos de seleção natural e da genética, que têm se mostrado eficientes em uma grande variedade de problemas, pois se sobrepõem a muitas das limitações encontradas nos métodos de busca/otimização tradicionais [37]. Os sistemas obtidos da integração entre modelos de inferência *fuzzy* e Algoritmos Genéticos são denominados Sistemas *Fuzzy* Genéticos (SFGs) ou Sistemas *Fuzzy* Evolucionários (Evolutivos) [38–44].

2 Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos

2.1 Formulação Matemática

O planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos, com representação individualizada das usinas hidroelétricas e com vazões afluentes determinísticas pode ser formulado conforme o seguinte problema de otimização:

$$\min \quad \sum_{t=1}^T CVP_t \cdot 0,5 \cdot \Phi(E_t)^2 + V(x_T) \quad (1)$$

$$s.a. \quad E_t = D_t - H_t, \quad (2)$$

$$H_t = \sum_{i=1}^N k_i \cdot hl(x_{i,t}^{med}, u_{i,t}) \cdot \min[u_{i,t}, q_{i,t}^{max}], \quad (3)$$

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} + (y_{i,t}^{inc} + \sum_{k \in \Omega_i} u_{k,t} - u_{i,t} - x_{i,t}^{evap}) \cdot \left[\frac{\Delta t_t}{10^6} \right], \quad (4)$$

$$u_{i,t} = q_{i,t} + v_{i,t}, \quad (5)$$

$$x_{i,t}^{min} \leq x_{i,t} \leq x_{i,t}^{max}, \quad (6)$$

$$u_{i,t}^{min} \leq u_{i,t} \leq u_{i,t}^{max}, \quad (7)$$

$$q_{i,t}^{min} \leq q_{i,t} \leq q_{i,t}^{max}, \quad (8)$$

$$x_{i,0} \text{ dado}, \quad (9)$$

onde:

- T : número de intervalos do horizonte de planejamento;
- N : número de usinas hidroelétricas;
- CVP : coeficiente de valor presente;
- E_t : geração complementar (térmica, importação de energia e corte de carga) total [MW];
- H_t : geração hidroelétrica total [MW];
- D_t : demanda (mercado de energia elétrica) [MW];
- $x_{i,t}$: volume armazenado no reservatório i no final do intervalo t [hm³];
- $x_{i,t}^{med}$: volume médio armazenado no reservatório i no intervalo t [hm³];
- x^{evap} : volume evaporado no reservatório i no intervalo t [hm³];
- $hl_{i,t}$: altura de queda líquida da usina i no intervalo t [m];
- $y_{i,t}^{inc}$: vazão afluente incremental (lateral) ao reservatório da usina i no intervalo t [m³/s];
- $q_{i,t}$: vazão turbinada da usina i no intervalo t [m³/s];
- $u_{i,t}$: vazão defluente da usina i no intervalo t [m³/s];
- $v_{i,t}$: vazão vertida da usina i durante o intervalo t [m³/s];
- $x_{i,t}^{max}, x_{i,t}^{min}$: limites máximo e mínimo de volume armazenado para o reservatório da usina i no final do intervalo t [hm³];
- $u_{i,t}^{max}, u_{i,t}^{min}$: limites máximo e mínimo de vazão defluente para a usina i on intervalo t [m³/s];
- $q_{i,t}^{max}, q_{i,t}^{min}$: limites máximo e mínimo de vazão turbinada para a usina i no intervalo t [m³/s];
- Δt_t : duração do intervalo t em segundos [s];
- Ω_i : conjunto de índices das usinas imediatamente a montante da usina i .

A função objetivo é composta de dois termos, os quais representam o custo operacional durante o horizonte de planejamento (Φ) e os custos futuros associados com o estado de armazenamento final dos reservatórios das usinas hidroelétricas a reseratório (V). Como o sistema brasileiro de produção de energia elétrica é um sistema hidrotérmico, com forte predominância da geração de origem hidráulica, para nossos propósitos, o sistema de geração complementar está sendo representado por uma usina termoelétrica equivalente que substitui todo o sistema não-hidráulico, inclusive o déficit de geração, visto como uma térmica fictícia. Assim, o custo operacional, o qual é dado pelo custo do combustível utilizado na operação das usinas termoelétricas, pelo custo de importação de energia de outros sistemas, e pelo custo da falta de suprimento de energia (penalidade devida ao não suprimento de carga), o chamado “custo de déficit”, é representado por uma única função de custo das fontes não-hidráulicas [45]. O custo futuro é uma condição terminal, utilizada nos modelos de otimização da operação energética, para equilibrar o uso da água durante o horizonte de planejamento e seu uso futuro [46].

A igualdade (2) representa a restrição de atendimento à demanda de energia elétrica no intervalo t . A geração hidráulica total do sistema hidroelétrico é representada pela equação (3), dada pelo somatório das funções de produção hidráulica de

cada usina hidroelétrica. A equação (4) representa a equação de balanço hídrico no reservatório. Essa restrição estipula que o volume armazenado no final do estágio t é igual ao volume inicial para esse estágio mais as vazões de entrada (vazões afluentes incrementais e vazões defluentes das usinas imediatamente a montante) menos as vazões de saída (turbinagem e vertimento) e o volume evaporado. A vazão de saída da usina corresponde a vazão defluente e equivale a soma da vazão turbinada com a vazão vertida, e está representada na equação (5). As restrições (6) e (7) representam os limites de armazenamento e de defluência das usinas hidroelétricas. Os limites apresentados nestas inequações variam no tempo, pois eles refletem as restrições operacionais das usinas e outras restrições associadas ao uso múltiplo da água, tais como: irrigação, controle de cheias, navegação, etc. A restrição (8) representa os limites mínimo e máximo de vazão turbinada, os quais podem estar associados a restrições físicas da própria usina ou a restrições elétricas. A restrição (9) corresponde ao volume inicial dos reservatórios (condição inicial de armazenamento no reservatório i)

2.2 Operação Otimizada de Reservatórios para Geração de Energia Elétrica

As Figuras 1, 2 e 3 exibem pontos representativos que ilustram o relacionamento entre a energia armazenada no conjunto de usinas (Figura 4) e o volume operativo de cada usina a reservatório durante a operação otimizada do sistema hidroelétrico. Esses pontos representam valores obtidos durante a otimização da operação do sistema hidroelétrico sujeito a variadas condições (situações) operativas.

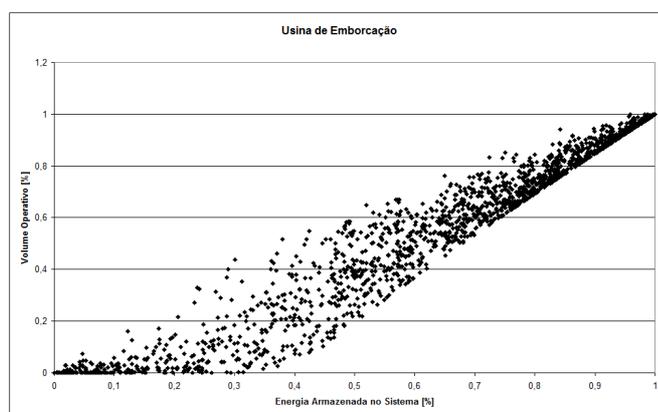


Figura 1: Pontos representativos da operação otimizada da usina de Emborcação.

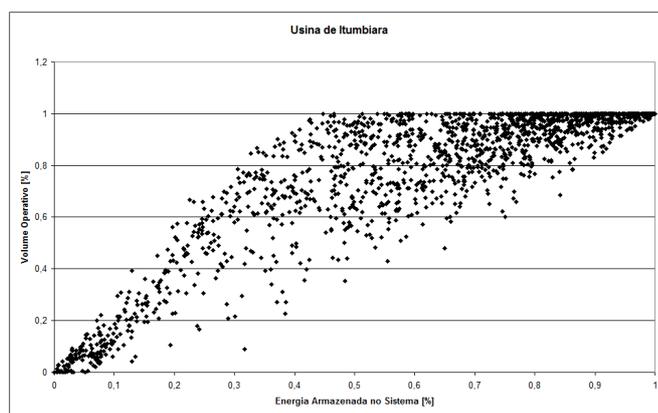


Figura 2: Pontos representativos da operação otimizada da usina de Itumbiara.

Vários trabalhos relacionam-se com a obtenção de regras de operação para reservatórios, diferenciando somente na técnica empregada para o ajuste dos pontos obtidos com a otimização da operação energética. Em [12], os autores utilizam funções polinomiais de terceiro grau para o ajuste dos pontos. As regras de operação obtidas foram testadas comparativamente com a regra de operação em paralelo, por meio de modelos de simulação e do reservatório equivalente. Em [47, 48], os autores fazem o ajuste das curvas por um algoritmo que usou o método dos mínimos quadrados, obtendo funções polinomiais e exponenciais para representar as regras de operação. As funções obtidas foram utilizadas em um modelo computacional de simulação de forma a serem avaliadas pela comparação de seu desempenho com a regra de operação em paralelo e com o resultado obtido por meio da operação otimizada a usinas individualizadas, com o conhecimento prévio das vazões afluentes. Os autores em [23–25] empregam o método dos mínimos quadrados no ajuste das funções polinomiais, exponenciais e lineares por partes. As regras de

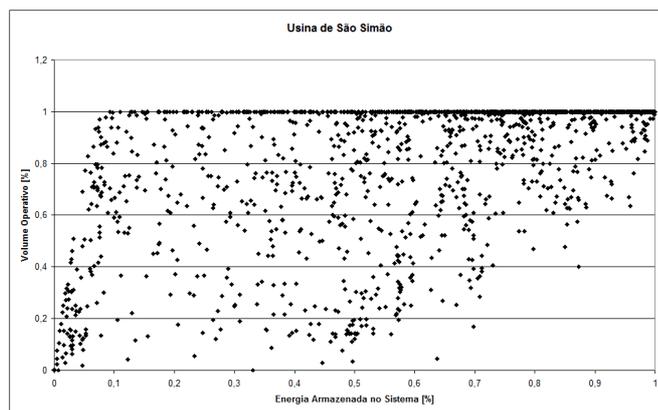


Figura 3: Pontos representativos da operação otimizada da usina de São Simão.

operação obtidas foram aplicadas na construção do reservatório equivalente de energia, comparando-as com a regra de operação em paralelo. Em [27, 49], são utilizadas Redes Neurais Artificiais (RNAs) [50], mais especificamente as redes SONARX, para a obtenção de regras de operação que siga os princípios da operação otimizada. A rede SONARX foi integrada a um simulador da operação de sistemas hidroelétricos, em que a cada instante de tempo, o conjunto rede-simulador decide quanto cada usina deve gerar. Em [51], é proposta uma metodologia para simulação da operação de usinas hidroelétricas utilizando RNAs com arquitetura RBF (*Radial Basis Function*). Entretanto, apesar das RNAs serem conhecidas pelo bom desempenho quando utilizadas como aproximadores funcionais, elas não permitem ao usuário uma compreensão facilitada de como suas decisões foram realizadas, ou seja, são designadas como caixas pretas, devido a sua incapacidade de explicar como e por que suas respostas foram geradas. Além disso, necessitam de um grande conjunto de treinamento para garantir que os pesos sinápticos sejam ajustados para fornecer soluções que generalizem o problema.

Uma aplicação bastante comum dos sistemas de inferência *fuzzy* é sua utilização para aproximação de funções. O modelo de inferência *fuzzy* Takagi-Sugeno [52] foi proposto como resultado de um esforço para se desenvolver, de forma sistemática, uma abordagem para a obtenção de regras de produção *fuzzy* a partir de dados de entrada e saída. Em [26, 53] os autores apresentam uma metodologia baseada em sistemas de inferência *fuzzy* Takagi-Sugeno para obtenção de regras de operação, bem como da aplicação destas regras na simulação da operação energética de sistemas hidroelétricos. As regras de operação são obtidas pelo ajuste dos consequentes das regras de produção *fuzzy* por meio dos pontos obtidos com a operação otimizada dos reservatórios.

Entretanto, devido a algumas características do planejamento da operação como não-linearidade, não-convexidade e o acoplamento temporal e espacial, pode-se perceber uma dispersão bastante acentuada nos pontos representativos da operação otimizada o que implica na dificuldade em expressar de forma precisa (crisp) uma relação entre as variáveis. A dispersão encontrada tem implicado que a simulação da operação usando as regras de operação obtidas nos trabalhos mencionados não conseguem seguir precisamente as trajetórias obtidas pelo modelo de otimização da operação energética de sistemas hidroelétricos. Apesar da dispersão observada nos pontos, pode-se perceber o comportamento diferenciado dos reservatórios na operação energética otimizada, pois a determinação do volume dos reservatórios em função da energia armazenada no sistema é feita em função do posicionamento deles na cascata. Verifica-se que o reservatório mais a montante (Emborcação) apresenta níveis mais reduzidos de água quando comparado aos reservatórios de Itumbiara e São Simão. Assim, as usinas hidroelétricas situadas em um sistema em cascata sofrem a influência da sua localização na cascata. Isto ocorre porque a energia obtida pela água armazenada no reservatório de uma usina depende não apenas das condições deste reservatório, mas também do volume armazenado nos reservatórios das usinas localizadas a sua jusante, porque esta água será valorizada em todas as usinas rio abaixo. Desta forma, a maneira de operar as usinas pode alterar substancialmente a geração hidráulica obtida de um sistema hidroelétrico, pois dependendo de como a água dos seus reservatórios for utilizada, obtém-se uma certa quantidade de energia elétrica gerada.

2.3 Regras de Operação de Reservatórios

As regras de operação procuram determinar qual o comportamento de cada usina a reservatório, a fim de estabelecer um comportamento relativo entre elas. Para isso, as regras de operação procuram estabelecer relações entre os volumes de cada usina (comportamento do reservatório) e a energia armazenada total do sistema [54]. Para implementar o acoplamento na operação energética de sistemas hidroelétricos, define-se um parâmetro global, denominado fator de acoplamento da operação energética entre as usinas, denotado por λ , e especificado no intervalo $0 \leq \lambda \leq 1$. Assim, pode-se calcular o volume operativo do reservatório de cada usina em função deste parâmetro. Desta forma, o volume de cada usina a reservatório é determinado pela seguinte equação:

$$x_{i,t}(\lambda) = x_{i,t}^{min} + f_i(\lambda) \cdot (x_{i,t}^{max} - x_{i,t}^{min}) \quad (10)$$

onde:

- $x_i(\lambda)$: volume operativo da usina i em função do fator de acoplamento da operação energética;

- $f_i(\lambda)$: regra de operação do reservatório da usina i em função do parâmetro λ .

O fator de acoplamento da operação energética representa a porcentagem de armazenamento do sistema, e é calculado como a proporção entre a energia armazenada no sistema e a energia armazenada máxima no sistema. A função $f_i(\lambda)$ é a regra de operação da usina i , portanto, ela expressa as regras de esvaziamento/enchimento do reservatório.

3 Sistema de Inferência *Fuzzy*

Seres humanos são capazes de lidar com processos bastante complexos, baseados em informações imprecisas ou incertas. A estratégia adotada pelos operadores humanos é também de natureza imprecisa e aproximada além de geralmente ser expressa em termos linguísticos. A teoria de conjuntos *fuzzy* [55] e os conceitos de lógica *fuzzy* [56, 57] podem ser utilizados para traduzir em termos matemáticos a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras linguísticas. Se um especialista humano for capaz de mapear 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 a base matemática necessária para se lidar com as informações imprecisas e com as regras linguísticas.

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

Nos sistemas de inferência *fuzzy*, geralmente, consideram-se entradas não-*fuzzy*, ou precisas; resultantes de observações ou medições, que é o caso da grande maioria das aplicações práticas. Em virtude disso, é necessário efetuar-se um mapeamento desses dados precisos para os conjuntos *fuzzy* (de entrada). A *fuzzificação* é um mapeamento do domínio da variável de entrada para o domínio *fuzzy*, representando a atribuição de valores linguísticos, descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência, às variáveis de entrada.

O procedimento de inferência *fuzzy* (ou lógica de tomada de decisão) é responsável por avaliar os termos primários das variáveis de entrada aplicando as regras de produção de forma a obter o valor da saída *fuzzy* do sistema de inferência.

Uma vez obtido o conjunto *fuzzy* de saída, no estágio de *defuzzificação* é efetuada uma interpretação dessa informação. Essa etapa é necessária, pois, em aplicações práticas, geralmente são requeridas saídas precisas. A *defuzzificação* é usada tipicamente para associar um valor numérico ao conjunto *fuzzy* de saída. Desta forma, a *defuzzificação* pode ser considerada uma espécie de síntese do conjunto *fuzzy* por meio de um valor numérico.

4 Algoritmos Genéticos

Algoritmos Genéticos são algoritmos de busca e/ou otimização baseados nos mecanismos da genética e da seleção natural. Seu funcionamento é baseado na inspiração biológica, a qual pressupõe que, em uma dada população, indivíduos com boas características genéticas têm maiores chances de sobrevivência e de gerarem indivíduos cada vez mais fortes (aptos). Ao utilizar AGs, cada indivíduo da população, denominado cromossomo, corresponde a uma solução para o problema a ser resolvido. Cada pedaço do cromossomo é chamada de gene. AGs enfatizam a combinação dos candidatos mais promissores para a solução do problema, ou seja, a combinação dos indivíduos mais aptos da população. Esta combinação dos indivíduos mais aptos é obtida pela aplicação dos operadores genéticos para explorar o espaço de busca visando encontrar melhores soluções para o problema. Os operadores genéticos mencionados são aproximações computacionais de fenômenos vistos na natureza, como a mutação genética e a reprodução sexuada.

Inicialmente, o funcionamento básico dos Algoritmos Genéticos consiste em gerar uma população (aleatoriamente ou deterministicamente), formada por um conjunto de indivíduos que representam possíveis soluções do problema. Durante o processo evolucionário, aplica-se uma função de avaliação para cada indivíduo da população, de forma a atribuir-lhe um índice de aptidão que caracteriza a qualidade do indivíduo como solução do problema. Baseado no índice de aptidão, uma parte dos indivíduos é selecionada aleatoriamente, enquanto os outros são descartados. Os indivíduos mantidos pelo processo de seleção estão sujeitos a formarem descendentes para a próxima geração por meio de modificações em suas características genéticas através da aplicação dos operadores genéticos como mutações e cruzamento (recombinação ou *crossover*). Esse processo iterativo continua até que uma solução satisfatória para o problema seja encontrada. Cada uma das iterações do processo é denominada de uma geração do AG. Para prevenir que os indivíduos mais aptos não desapareçam da população pela aplicação dos operadores genéticos, pode-se aplicar uma estratégia elitista [36], que consiste em colocar automaticamente os melhores indivíduos na próxima geração.

Apesar de aparentemente simples, devido em parte a sua fundamentação bioinspirada, os AGs são capazes de resolver problemas complexos de uma maneira muito elegante. Além disso, eles não são afetados por suposições sobre diferenciabilidade ou continuidade da função objetivo do problema, pois AGs não utilizam informações de derivadas no processo evolutivo, nem necessitam de informações sobre a vizinhança dos indivíduos. Isto implica que os AGs podem ser muito adequados para lidar com problemas com funções não-diferenciáveis e descontínuas. Adicionalmente, AGs operam sobre uma população de indivíduos, de forma a explorar diferentes pontos do espaço de busca paralelamente. Além disso, AGs diferenciam-se de técnicas aleatórias de busca e/ou otimização, por aplicarem o índice de aptidão, que é uma informação pertinente ao espaço de busca, obtida pelo uso da função de avaliação.

5 Simulação da Operação de Sistemas Hidroelétricos

A simulação da operação propõe verificar o comportamento operativo de um sistema hidroelétrico caso fosse submetido 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 regras de operação propostas, baseadas em sistemas *fuzzy* genéticos (ROBSFG), as regras de operação baseadas em funções matemáticas (ROBFM) (funções polinomiais e exponenciais [47]), a regra de operação paralela (ROP) [15], e a regra de operação baseada em sistemas *fuzzy* Takagi-Sugeno (ROSFTS); as simulações da operação são realizadas sob as mesmas condições de operação. Portanto, as diferenças de comportamento na operação do sistema hidroelétrico resultarão unicamente das regras operacionais utilizadas.

5.1 Sistema Hidroelétrico Utilizado

A Figura 4 ilustra o sistema hidroelétrico utilizado neste trabalho. Este sistema é composto por 7 usinas hidroelétricas do sistema brasileiro (Emborcação, Itumbiara, São Simão, Furnas, Marimbondo, Água Vermelha e Ilha Solteira), o qual pode ser caracterizado como um sistema complexo, pois contém usinas de grande porte, interligadas em paralelo e em cascata.

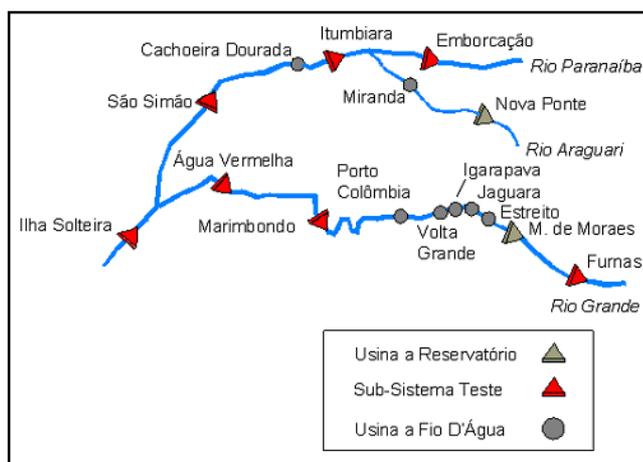


Figura 4: Sistema hidroelétrico utilizado.

5.2 Horizonte de Planejamento

A complexidade do planejamento da operação não pode ser acomodada por um modelo matemático único, tornando-se necessária a utilização de cadeias de modelos com diferentes horizontes de planejamento e graus de detalhe na representação do sistema hidrotérmico de geração [58]. Neste trabalho, adotou-se o planejamento energético com horizontes de cinco anos, discretizados mensalmente, o que implica em um horizonte composto por 60 intervalos, mas considerando-se a representação individualizada das usinas hidroelétricas. Para aplicações em ambiente competitivo, com usinas pertencentes a diferentes empresas, a representação individualizada das usinas hidroelétricas, normalmente adotada no planejamento de curto prazo, é muito interessante, principalmente porque ela permite que as decisões sejam tomadas a partir de modelos de otimização/simulação que conseguem avaliar as condições individuais de operação de cada aproveitamento. A simplificação da representação equivalente do sistema hidroelétrico faz com que o parque gerador não seja aproveitado da forma mais eficiente possível, uma vez que o reservatório equivalente de energia não consegue representar as características operativas individuais das usinas e, consequentemente, de seus respectivos acoplamentos hidráulicos [7, 59]. Esses fatores, portanto, levam a uma utilização ineficiente por parte do parque gerador hidráulico [20]. Desta forma, a representação individualizada de cada usina hidroelétrica é importante, visto que o objetivo principal do planejamento da operação energética é determinar as metas de operação de cada usina, a cada intervalo, respeitando o acoplamento hidráulico das diversas cascatas existentes no sistema, e que aproveite as possíveis diversidades hidrológicas entre os vários rios.

6 Aspectos da Implementação do Sistema Fuzzy Genético

6.1 Sistema Fuzzy de Mamdani

Os sistemas de inferência *fuzzy* implementados têm 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 5).

Neste trabalho, especializou-se para cada uma das 7 usinas, um sistema *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:

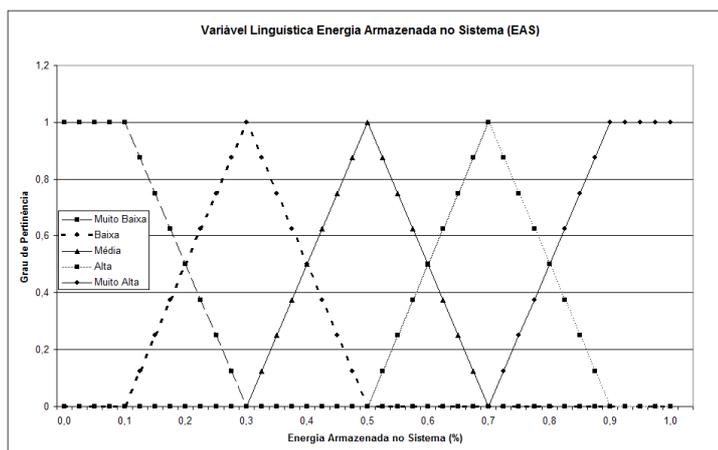


Figura 5: Variável linguística de entrada representando a energia armazenada no sistema.

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

Para cada sistema *fuzzy* de Mamdani, AGs foram empregados para otimizar o ajuste das funções de pertinência associadas aos conjuntos *fuzzy* relativos aos consequentes de cada regra de produção. O sistema *fuzzy* obtido, a partir de valores numéricos normalizados da variável de entrada (EAS), pode realizar inferências, e obter o valor da variável de saída (volume operativo do reservatório). Para isto, as regras são inferidas de forma paralela, sem considerar a ordem em que elas estão implementadas. 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 [60, 61].

6.2 Algoritmos Genéticos

A abordagem adotada neste trabalho propõe o uso de Algoritmos Genéticos para o ajuste das funções de pertinência associadas à variável linguística volume útil em cada um dos 7 sistemas *fuzzy*. O ajuste diferenciado na variável linguística de saída em cada um dos sistemas de inferência *fuzzy* de Mamdani é feito de forma a representar o comportamento diferenciado de cada reservatório na operação otimizada do sistema.

O primeiro aspecto a ser considerado no uso de AGs para a solução de um problema é a representação cromossomial desse problema, para que os AGs possam solucioná-lo de forma adequada. A representação cromossomial consiste em uma maneira de mapear a informação dos parâmetros do problema em uma maneira viável de ser tratada pelo AG. Ao projetar um sistema *fuzzy* usando um AG, deve-se mapear o sistema *fuzzy* dentro de um cromossomo. Um sistema *fuzzy* é especificado somente quando a base de regras e a definição das funções de pertinência de cada variável linguística são especificadas [39]. Neste trabalho, como a base de regras já foi previamente definida, baseada na experiência dos autores em relação ao comportamento otimizado dos reservatórios, os cromossomos só contêm informações sobre as funções de pertinência da variável linguística de saída (volume útil). Como o problema tem parâmetros contínuos que necessitam de grande precisão, adotou-se a representação do cromossomo por meio de números reais [62]. As funções de pertinência utilizadas para as variáveis linguísticas foram triangulares e trapezoidais. As variáveis linguísticas de saída de cada um dos 7 sistemas *fuzzy* têm 5 funções de pertinência, 2 trapezoidais representando os conjuntos *fuzzy* muito baixo e muito alto, e 3 triangulares representando os conjuntos baixo, médio e alto. Devido à distribuição adotada dos conjuntos *fuzzy*, cada função de pertinência trapezoidal necessita de 2 parâmetros para representá-la, e cada função de pertinência triangular precisa de 3, portanto são utilizados 13 genes para cada sistema de inferência *fuzzy*, o que implica em um cromossomo com 91 genes, devido ao fato de cada cromossomo armazenar informações sobre o sistema hidroelétrico como um todo. Os valores dos genes são números reais que variam entre 0 e 1 e a população é composta por 80 indivíduos.

Após a definição da representação cromossomial, o projeto do AG enfoca a especificação de uma função de avaliação. A função de avaliação atribui um valor numérico que reflete o grau de adequação dos parâmetros representados no cromossomo e,

portanto, ela é a maneira usada para determinar a qualidade de um indivíduo como solução do problema em questão. Como a disponibilidade de água, num dado intervalo, depende do grau de sua utilização anterior, este trabalho empregou como função de avaliação a diferença entre a máxima energia armazenada possível de ser obtida no sistema e a energia armazenada no sistema relativa ao último intervalo do horizonte de planejamento. Visto que as decisões tomadas em um intervalo do planejamento dependem das decisões tomadas no passado e determinam a evolução futura do sistema hidroelétrico, a utilização da energia armazenada no último intervalo do horizonte é viável, pois ela leva em consideração a ligação entre as decisões operativas no tempo, comumente conhecida como acoplamento temporal. Numericamente, a função de avaliação é representada por (11), onde 60 indica o índice do último intervalo do horizonte de planejamento:

$$\text{Função de avaliação} = EAS^{MAX} - EAS_{60} \quad (11)$$

Portanto, tem-se um problema de minimização, cujo objetivo está em encontrar o maior valor de energia armazenada no sistema, de forma a minimizar a diferença em relação à máxima energia possível de ser armazenada no sistema.

Após a atribuição do índice de aptidão pela função de avaliação, o processo de seleção escolhe um subconjunto de indivíduos da população atual, para compor uma população intermediária, de forma a aplicar os operadores genéticos. O método de seleção adotado neste trabalho foi o método do torneio, o qual consiste em uma pré-seleção de indivíduos da população para fazer com que eles entrem em competição direta para serem selecionados efetivamente. Neste método, há um parâmetro denominado tamanho do torneio que define quantos indivíduos são pré-selecionados aleatoriamente dentro da população para competir. Com a definição dos indivíduos participantes do torneio, o indivíduo com maior índice de aptidão é selecionado para aplicação do operador genético. Vale mencionar que o tamanho do torneio adotado foi igual a 2. Em combinação com o módulo de seleção, foi usada uma estratégia elitista, com a manutenção do melhor indivíduo de uma geração para outra.

Para fazer com que a população passe por uma evolução, aplica-se os operadores genéticos. Os operadores genéticos, cruzamento e mutação, são utilizados para transformar a população por meio de sucessivas gerações, de forma a estender a busca/otimização a um resultado satisfatório. O cruzamento é o operador responsável pela recombinação genética dos pais, para permitir que a próxima geração herde essas características. Neste trabalho, empregou-se o cruzamento discreto [63, 64]. O operador genético da mutação [65] é necessário para introduzir e manter a diversidade genética da população, através da mudança aleatória de genes dentro dos cromossomos, o que fornece meios para incorporação de novas características genéticas dentro da população. Portanto, a mutação assegura a possibilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca, além de ajudar a contornar o problema de mínimos locais. Entretanto, a mutação é aplicada de forma menos frequente que o cruzamento, com o intuito de preservar o relacionamento exploração-aproveitamento [66].

Vários critérios podem ser aplicados para finalizar a execução de um AG. Os principais critérios são

- Qualidade: quando for obtida uma solução que modela perfeitamente os dados, então não há necessidade de continuar a evoluir as soluções, pois não há como melhorar os resultados obtidos até aquele ponto. Adicionalmente, caso seja conhecida a resposta ótima da função de avaliação, pode-se utilizar este valor como critério de parada;
- Estagnação: interrompe-se a execução se não for obtida melhora na avaliação do melhor indivíduo por n gerações, onde n é um parâmetro fornecido pelo usuário;
- Tempo: fixa-se um limite máximo de gerações para a execução do algoritmo.

Neste trabalho, os critérios de qualidade e tempo foram aplicados, com o limite máximo de gerações igual a 100.

Como resultado da operação dos AGs no ajuste dos sistemas *fuzzy*, as Figuras 6, 7 e 8 exibem as funções de pertinência associadas à variável linguística volume útil das usinas de Furnas, Água Vermelha e Ilha Solteira. Pode-se observar uma distribuição diferenciada dos conjuntos *fuzzy* (MB - Muito Baixo, B - Baixo, M - Médio, A - Alto e MA - Muito Alto) para cada reservatório, no qual o posicionamento das funções de pertinência é feita em função da localização da usina na cascata.

7 Aplicações e Discussões

Neste trabalho, empregou-se um modelo computacional de simulação da operação de sistemas hidroelétricos, de modo a permitir a avaliação do desempenho das regras de operação propostas. O modelo de simulação utilizado é parte de uma ferramenta computacional [67] que vem sendo desenvolvida pelos autores para a realização de estudos relacionados ao planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de geração. A ferramenta compreende, além do modelo de simulação, um modelo de otimização da operação energética de sistemas hidrotérmicos. Deve ser frisado que os autores aplicaram um processo de desenvolvimento (UML *Components*) [68] baseado em componentes de software [69] para a construção dos modelos computacionais supracitados, de forma a nortear o desenvolvimento da ferramenta, com a possibilidade de incluir ou modificar requisitos de uma maneira ordenada, mesmo quando a aplicação já se encontra em operação [70].

7.1 Condições de Operação

Foram realizados cinco estudos de caso, considerando as vazões afluentes das usinas para os períodos de 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. Para determinação da meta de geração hidráulica (demanda ou mercado de energia elétrica), foi realizada a otimização da operação energética do sistema hidroelétrico

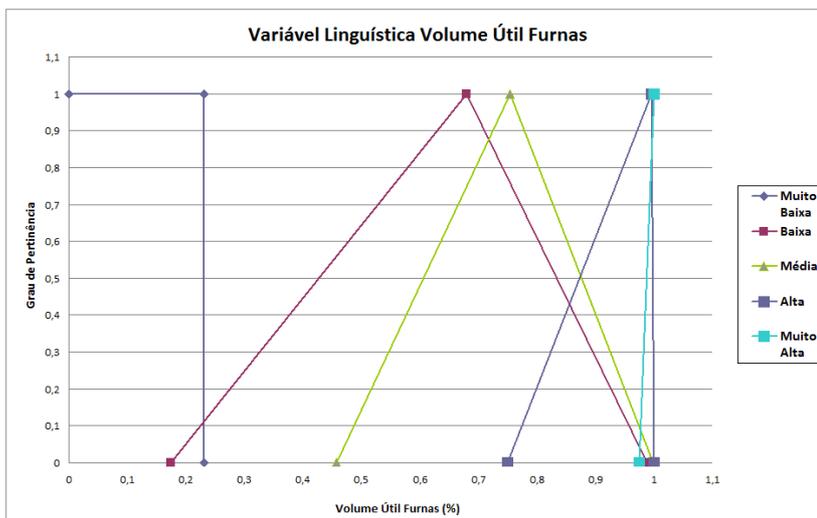


Figura 6: Variável linguística de saída representando o volume útil da usina de Furnas.

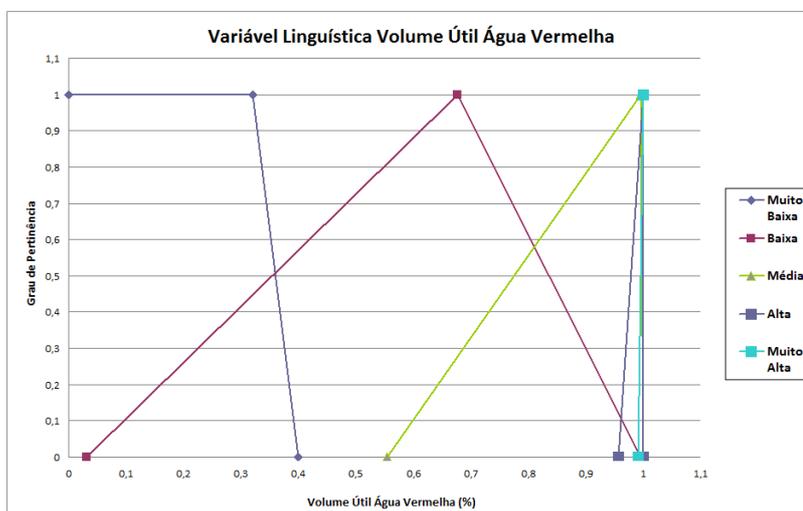


Figura 7: Variável linguística de saída representando o volume útil da usina de Água Vermelha.

com as vazões afluentes realmente ocorridas nos períodos, de forma a obter-se a solução com o perfeito conhecimento das vazões afluentes para todo o horizonte de planejamento. As vazões afluentes naturais utilizadas nas simulações operativas correspondem às vazões verificadas para os mesmos períodos do histórico. Adotou-se o mês de Maio (início do período seco para a bacia hidrográfica do sistema sudeste) como o mês de início para todos os estudos de caso. Considerou-se, em todos os estudos de caso, o volume inicial armazenado nos reservatórios, como sendo igual ao volume máximo operativo.

7.2 Resultados

Os resultados ilustrados pelas Figuras 9 e 10 evidenciam as oscilações dos volumes dos reservatórios em função da localização da usina na cascata através da aplicação da ROBSFG. Com a influência predominante do efeito cota [17], 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 Água Vermelha 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 Água Vermelha, 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 da ROBSFG enfatizou o enchimento dos reservatórios de jusante para montante, e o esvaziamento dos reservatórios de montante para jusante.

As regras de operação baseadas na implementação de Sistemas *Fuzzy*-Genéticos têm estabelecido um perfil especializado

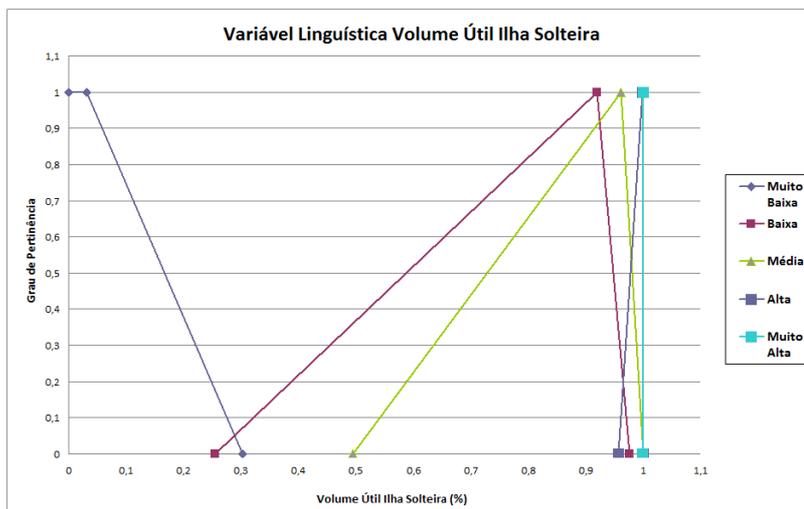


Figura 8: Variável linguística de saída representando o volume útil da usina de Ilha Solteira.

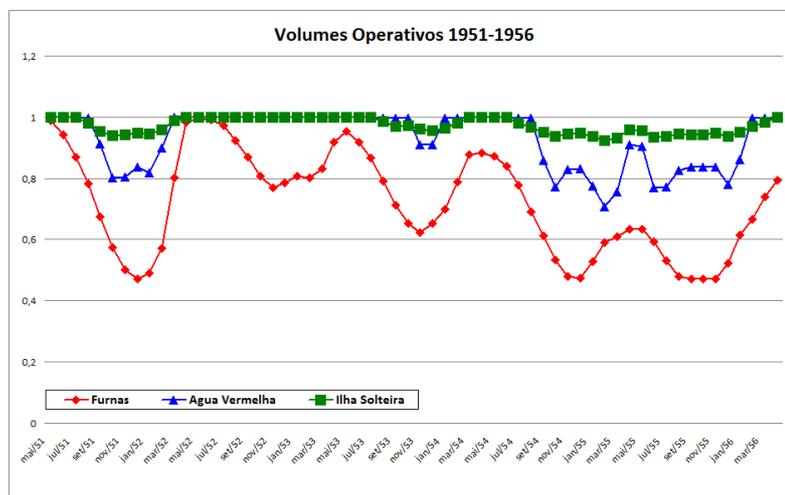


Figura 9: Trajetórias de volume nos reservatórios de algumas usinas do sistema (1951 a 1956).

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 11, 12 e 13 ilustram a maior eficiência fornecida na utilização dos recursos hidroelétricos de geração pela regra de operação baseada em sistemas *fuzzy* genéticos quando comparada à regra de operação em paralelo e à regra de operação baseada em funções matemáticas. Pode-se perceber um esvaziamento mais severo do conjunto dos reservatórios ao se utilizar a ROP, a ROBFM e a ROSFTS, o que implica uma maior eficiência na utilização da água dos reservatórios, pela ROBSFG. Pode-se frisar ainda que, durante todo o horizonte de planejamento, a ROBSGF sempre apresentou valores mais altos de energia armazenada no sistema, confirmando que esta regra de operação para os reservatórios necessita utilizar menos água para atender ao mesmo mercado de energia elétrica. Adicionalmente, ao final do horizonte de planejamento, pode-se visualizar que a ROP, a ROBFM e a ROSFTS não conseguem alcançar os níveis de armazenamento obtidos pela ROBSFG, fazendo com que a confiabilidade e o custo da operação estejam extremamente comprometidos na operação contínua do sistema. Portanto, a ROBSFG permite que a simulação da operação do sistema hidroelétrico seja consistente com a operação contínua do sistema, já que ele não deixa de ser operado com o final do horizonte de planejamento.

Desta forma, pode-se verificar que a ROBSFG pode assegurar um fornecimento mais confiável e econômico da energia elétrica. Econômico porque ela necessita de menos recursos hidráulicos de geração que a ROP, a ROBFM e a ROSFTS. 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 ROBSFG na otimização da utilização dos recursos hidráulicos, voltados para a geração de energia elétrica. Além do mais, a ROBSFG é bastante condizente com os objetivos do planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos, pois a otimização dos recursos hidráulicos busca minimizar a geração complementar. Dessa forma, quanto maior for o desempenho da

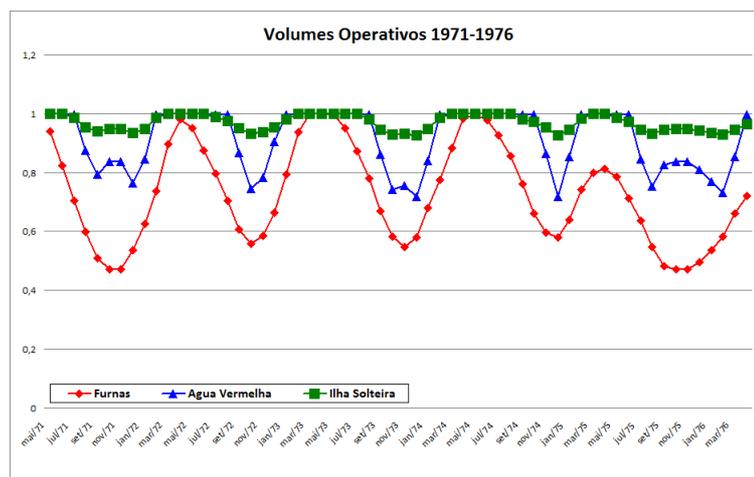


Figura 10: Trajetórias de volume nos reservatórios de algumas usinas do sistema (1971 a 1976).

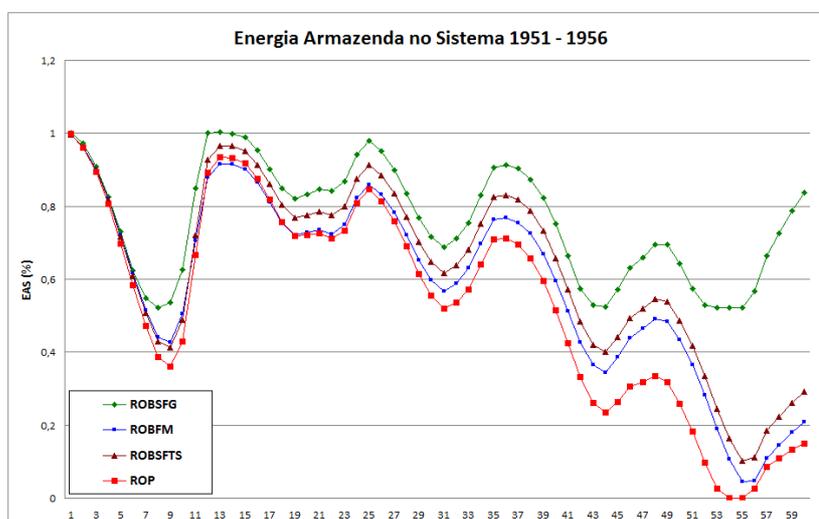


Figura 11: Trajetória de energia armazenada no sistema (1951 a 1956).

regra de operação dos reservatórios na utilização dos recursos hidroelétricos de geração, menor será a complementação necessária para atender ao mercado de energia elétrica.

A Tabela 1 apresenta a média da energia armazenada no sistema de forma a permitir uma verificação numérica da eficiência de cada regra na simulação da operação das usinas do sistema hidroelétrico.

As regras de operação baseadas na implementação de Sistemas Fuzzy Genéticos 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*. Com a influência predominante do efeito cota [17], as usinas cujo volume do reservatório não têm grande influência na produtividade do sistema possuem prioridade de deplecionamento. Já as usinas cujo volume operativo do reservatório têm grande influência na produtividade do sistema apresentam prioridade de enchimento. Como a energia armazenada em um sistema é valorizada pela produtividade das usinas mais a jusante, as regras de operação enfatizam o enchimento dos reservatórios de jusante para montante, e o deplecionamento dos reservatórios de montante para jusante. Desta forma, os reservatórios de montante, com a função adicional de regularizar a sazonalidade das vazões afluentes, são os que apresentam maiores oscilações no seu nível de armazenamento. Já os reservatórios de jusante, com a função de manter a máxima produtividade, geralmente não apresentam grandes oscilações, de forma a serem operados como usinas a fio d'água.

8 Conclusões

Este trabalho enfatizou a especificação de regras de operação de reservatórios por meio de Sistemas *Fuzzy* Genéticos. 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, especializou-se um sistema *fuzzy* para cada usina hidroelétrica, de

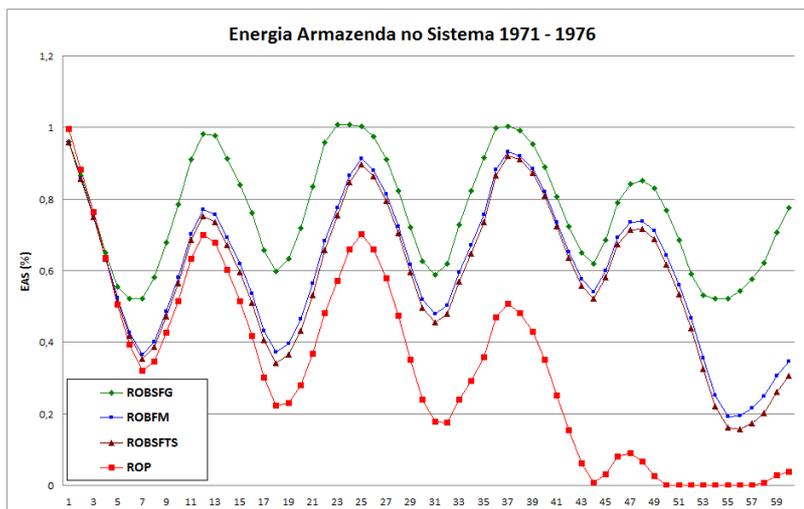


Figura 12: Trajetória de energia armazenada no sistema (1971 a 1976).

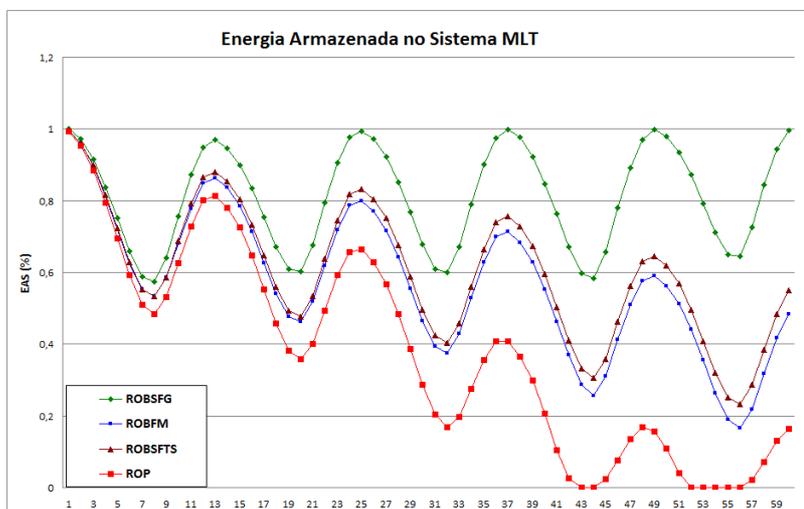


Figura 13: Trajetória de energia armazenada no sistema (MLT).

forma a representar o comportamento diferenciado de cada reservatório na operação otimizada do sistema. Algoritmos Genéticos foram aplicados para sintonizar as funções de pertinência da variável linguística do consequente das regras de produção dos N sistemas *fuzzy*.

A regra de operação de reservatório proposta foi aplicada e comparada, por meio de alguns estudos de caso, com a regra de operação paralela e a regra de operação baseada em funções matemáticas. Os resultados evidenciaram a eficiência da regra proposta quando utilizada na simulação da operação energética 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* Genéticos, as usinas de jusante, sempre que possível, permaneceram cheias, de forma a manter alta produtividade e valorizar os volumes de água que fluem 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 ROBSFG 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 ROP e a ROBFBM não conseguem manter os níveis de armazenamento dos reservatórios do sistema próximos dos níveis de armazenamento estabelecidos pela ROBSFG, 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

Tabela 1: Média da Energia Armazenada no Sistema Hidroelétrico [MW].

Hor. de Planejamento	RORP	RORFM	RORSFTS	RORSFG
1936-1941	27865, 82	29773, 74	32299, 55	35858, 53
1951-1956	24232, 82	26817, 27	28851, 86	34674, 15
1971-1976	14329, 13	27517, 44	26544, 69	34791, 76
2000-2005	18151, 44	21761, 86	25847, 11	36068, 96
MLT	17171, 52	25950, 09	27437, 61	36881, 12

hidroelétrico, obtém-se uma estratégia de ação/controla 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/controla 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] S. Soares. “Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos”. *Revista SBA: Controle e Automação*, vol. 1, no. 2, pp. 122–131, 1987.
- [3] 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.
- [4] H. Duran, C. Puech, J. Diaz and G. Sanchez. “Optimal Operation of Multireservoir Systems using an Aggregation-decomposition Approach”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, , no. 8, pp. 2086–2092, 1985.
- [5] P. T. Leite, A. A. F. M. Carneiro and A. C. P. L. F. Carvalho. “Energetic Operation Planning Using Genetic Algorithms”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 173–179, 2002.
- [6] S. Mousavi, K. Ponnambalam and F. Karray. “Inferring Operating Rules for Reservoir Operations using Fuzzy Regression and ANFIS”. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 158, no. 10, pp. 1064–1082, 2007.
- [7] E. L. Silva and E. C. Finardi. “Planning of Hydrothermal Systems Using a Power Plant Individualistic Representation”. In *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings*, volume 3, 2001.
- [8] C. E. Zoumas, A. G. Bakirtzis, J. B. Theocharis and V. Petridis. “A Genetic Algorithm Solution Approach to the Hydrothermal Coordination Problem”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 2, 2004.
- [9] 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.
- [10] N. V. Arvanitidis and J. Rosing. “Optimal Operation of Multireservoir Systems Using a Composite Representation”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 2, pp. 327–335, 1970.
- [11] Z. Yu, F. Sparrow and D. Nderitu. “Long-term Hydrothermal Scheduling using Composite Thermal and Composite Hydro Representations”. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, pp. 210 – 216, 1998.
- [12] 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.
- [13] J. A. Gonzalez. “Probabilistic Production Costing Modeled With AMPL”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 2, 2002.
- [14] E. Silva and E. Finardi. “Parallel Processing applied to the Planning of Hydrothermal Systems”. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, pp. 721–729, 2003.
- [15] 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.

- [16] C. Lyra and H. Tavares. “A Contribution to the Midterm Scheduling of Large Scale Hydrothermal Power Systems”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 852–857, 1988.
- [17] E. G. Read. “Economic Principles of Reservoir Operation I: Perfect Foresight”. *CBER Working Paper, College of Business Administration, University of Tennessee*, 1982.
- [18] R. Sacchi, J. S. Nazareno, M. A. A. Castro, D. Silva Filho and A. A. F. M. Carneiro. “Economics Principles of the Hydrothermal Power Systems Operation”. In *IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning*, 2004.
- [19] S. Sjelvgren, S. Anderson and T. S. Dillon. “Optimal Operations Planning in a Large Hydro-Thermal Power System”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 102, no. 11, pp. 3644 – 3651, November 1983.
- [20] 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.
- [21] Z. Yu, F. T. Sparrow and B. H. Bowen. “A New Long-Term Hydro Production Scheduling Method for Maximizing the Profit of Hydroelectric Systems”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 66 – 71, February 1998.
- [22] A. J. Wood and B. F. Wollenberg. *Power Generation, Operation, and Control*. John Wiley and Sons, 1984.
- [23] G. Cruz Jr and S. Soares. “Non-Parallel Composite Representation of Hydroelectric Systems for Long-Term Hydrothermal Scheduling”. In *IEEE Power Industry Computer Applications Conference*, pp. 566–571, 1995.
- [24] G. C. Cruz Jr and S. Soares. “Non-Uniform Composite Representation Hydroelectric Systems for Long-Term Hydrothermal Scheduling”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 702–707, 1996.
- [25] G. C. Cruz Jr and S. Soares. “General Composite Representation of Hydroelectric Systems”. In *Power Industry Computer Applications, 1999. PICA'99. Proceedings of the 21st 1999 IEEE International Conference*, pp. 177–182, 1999.
- [26] 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.
- [27] R. Sacchi, A. A. F. M. Carneiro and A. F. R. Araújo. “Operation Policies for Hydropower Systems: Using the Unsupervised SONARX Neural Network”. *IEEE - Power Systems Conference & Exposition*, 2004.
- [28] E. H. Mamdani. “Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant”. *Proceedings of IEE Control and Science*, vol. 121, no. 12, pp. 1585–1588, 1974.
- [29] 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.
- [30] L. Zadeh. “Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 3, no. 1, pp. 28–44, 1973.
- [31] W. Pedrycz and F. Gomide. *An Introduction to Fuzzy Sets*. MIT Press Cambridge, MA, 1998.
- [32] O. Cordón, F. Herrera and P. Villar. “Analysis and Guidelines to Obtain a Good Uniform Fuzzy Partition Granularity for Fuzzy Rule-Based Systems Using Simulated Annealing*”. *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 25, no. 3, pp. 187–215, 2000.
- [33] P. Bonissone, P. Khedkar and Y. Chen. “Genetic Algorithms for Automated Tuning of Fuzzy Controllers: A Transportation Application”. In *Proceedings of the 1996 5th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, volume 1, pp. 674–680. Citeseer, 1996.
- [34] O. Cordón, F. Herrera and P. Villar. “Generating the Knowledge Base of a Fuzzy Rule-Based System by the Genetic Learning of the Data Base”. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 667–674, 2001.
- [35] L. Zheng. “A Practical Guide to Tune of Proportional and Integral (PI) Like Fuzzy Controllers”. In *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, pp. 633–640. IEEE, 1992.
- [36] D. E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1989.
- [37] R. L. Haupt and S. E. Haupt. *Practical Genetic Algorithms*. Wiley New York, 1998.
- [38] O. Cordon, F. Herrera, F. Hoffman and L. Magdalena. *Genetic Fuzzy Systems - Evolutionary Tuning and Learning of Fuzzy Knowledge Bases*. World Scientific, 2001.

- [39] Y. Shi, R. Eberhart and Y. Chen. “Implementation of Evolutionary Fuzzy Systems”. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 109–119, 1999.
- [40] P. Fleming and R. Purshouse. “Evolutionary Algorithms in Control Systems Engineering: a survey”. *Control Engineering Practice*, vol. 10, no. 11, pp. 1223–1241, 2002.
- [41] F. Hoffmann. “Evolutionary Algorithms for Fuzzy Control System Design”. *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 9, pp. 1318–1333, 2001.
- [42] Y. Huang, H. Yang and C. Huang. “Developing a new Transformer Fault Diagnosis System through Evolutionary Fuzzy Logic”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 2, pp. 761–767, 1997.
- [43] M. Lee and H. Takagi. “Integrating Design Stages of Fuzzy Systems using Genetic Algorithms”. In *Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, volume 1, pp. 612–617. Citeseer, 1993.
- [44] 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.
- [45] M. F. Carvalho and S. Soares. “An Efficient Hydrothermal Scheduling Algorithm”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 537–542, 1987.
- [46] L. Martinez and S. Soares. “Comparison between closed-loop and partial open-loop feedback control policies in long term hydrothermal scheduling”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 330–336, 2002.
- [47] A. A. F. M. Carneiro and M. Kadowaki. “Regras de Operação Para Grandes Sistemas Hidroelétricos em Cascata”. In *Anais do 11o Congresso Brasileiro de Automática*, 1996.
- [48] M. Kadowaki. “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, 1995.
- [49] R. Sacchi, A. A. F. M. Carneiro and A. F. R. Araújo. “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*, 2004.
- [50] S. Haykin. *Neural Networks and Learning Machines*. Prentice Hall, 2008.
- [51] D. Silva Filho, A. A. F. M. Carneiro and A. F. R. Araújo. “Redes RBF Aplicadas à Simulação da Operação de Usinas Hidroelétricas”. In *IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais*, pp. 275–280, 1999.
- [52] 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.
- [53] R. A. L. Rabelo, A. A. F. M. Carneiro and R. T. V. Braga. “Um Sistema de Inferência Fuzzy Paramétrico Aplicado ao Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Geração.” In *IX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2009, Brasília.*, volume 09, 2009.
- [54] R. M. Silva. “Avaliação da Operação Otimizada de Usinas Hidrelétricas.” Master’s thesis, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2003.
- [55] L. Zadeh. “Fuzzy Sets*”. *Information and control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.
- [56] L. Zadeh. “Soft Computing and Fuzzy Logic”. *IEEE software*, vol. 11, no. 6, pp. 48–56, 1994.
- [57] L. A. Zadeh. “Fuzzy Logic = Computing with Words”. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 4, no. 2, 1996.
- [58] M. V. F. Pereira. “Optimal Scheduling of Hydrothermal Systems - An Overview”. In *IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems*, 1985.
- [59] E. J. Oliveira, A. L. M. Marcato, R. S. Rocha, L. W. Oliveira, I. C. S. Silva Jr. and J. L. R. Pereira. “Influência da Variação da Produtividade das Usinas Hidrelétricas no Cálculo da Energia Firme”. *SBA: Controle & Automação.*, vol. 20, no. 2, pp. 247–255, 2009.
- [60] T. J. Ross. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Wiley, 2004.
- [61] H. J. Zimmermann. *Fuzzy Set Theory – and its Applications*. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [62] T. Srikanth and V. kamala. “A Real Coded Genetic Algorithm for Optimization of Cutting Parameters in Turning”. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 8, no. 6, pp. 189 – 193, 2008.

- [63] F. Herrera, M. Lozano and A. M. Sánchez. “Hybrid Crossover Operators for Real-coded Genetic Algorithms: an Experimental Study”. *Soft Computing-A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, vol. 9, no. 4, pp. 280 – 298, 2005.
- [64] F. Herrera, M. Lozano and A. M. Sánchez. “A Taxonomy for the Crossover Operator for Real-Coded Genetic Algorithms: An Experimental Study”. *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 309–338, 2003.
- [65] R. Hinterding, H. Gielewski and T. Peachey. “The Nature of Mutation in Genetic Algorithms”. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 65–72. Citeseer, 1995.
- [66] F. Herrera, M. Lozano and J. Verdegay. “Tackling Real-Coded Genetic Algorithms: Operators and Tools for Behavioural Analysis”. *Artificial Intelligence Review*, vol. 12, no. 4, pp. 265–319, 1998.
- [67] R. A. L. Rabelo, W. N. M. Lopes, A. A. F. M. Carneiro and R. T. V. Braga. “Análise, Projeto e Implementação Orientado a Objetos Aplicados ao Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Potência”. In *XVII Congresso Brasileiro de Automática*, 2008.
- [68] J. Cheesman and J. Daniels. *UML components*. Addison-Wesley Boston, 2001.
- [69] C. Szyperski. *Component Software - Beyond Object Oriented Programming*. Addison-Wesley, 2002.
- [70] 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.