

## **Modelagem de controle fuzzy aplicado ao gerenciamento de potência em sistemas de aquecimento residencial: uma abordagem baseada em temperatura e umidade**

Vitor Amadeu Souza<sup>1</sup>; 0009-0002-1857-6799

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.  
[vitor.amadeu@foa.org.br](mailto:vitor.amadeu@foa.org.br)

**Resumo:** Este trabalho apresenta o desenvolvimento e modelagem computacional de um sistema de controle fuzzy para otimização do consumo energético em aquecedores residenciais, utilizando variáveis de temperatura ambiente e umidade relativa como parâmetros de entrada. O modelo proposto emprega lógica fuzzy para determinar automaticamente a potência adequada do aquecedor, visando maximizar o conforto térmico enquanto minimiza o consumo energético. A metodologia baseou-se na implementação computacional usando Python e scikit-fuzzy, definindo funções de pertinência triangulares para as variáveis linguísticas de entrada (temperatura: baixa, média, alta; umidade: baixa, média, alta) e saída (potência: baixa, média, alta), complementadas por sete regras de inferência fuzzy. Os resultados da simulação computacional demonstraram que o modelo é capaz de ajustar dinamicamente a potência do aquecedor em resposta às condições ambientais, proporcionando uma solução promissora para o controle automatizado de sistemas de climatização. Para um cenário teste com temperatura de 18°C e umidade de 65%, o modelo determinou uma potência de operação de 66,67%, evidenciando a capacidade do controlador modelado em interpretar adequadamente as condições de conforto térmico e responder com ajustes apropriados na potência de aquecimento.

**Palavras-chave:** Modelagem fuzzy. Simulação computacional. Eficiência energética. Sistemas de aquecimento. Automação residencial. Conforto térmico.

## INTRODUÇÃO

O consumo energético em edificações residenciais e comerciais representa uma parcela significativa da demanda total de energia elétrica mundial, sendo os sistemas de climatização responsáveis por aproximadamente 40% deste consumo (Pérez-Lombard *et al.*, 2008). Neste contexto, o desenvolvimento de estratégias de controle inteligente para sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC) tornou-se uma prioridade para a sustentabilidade energética e redução de custos operacionais. A crescente preocupação com a eficiência energética e a redução das emissões de gases do efeito estufa tem impulsionado pesquisas direcionadas ao desenvolvimento de sistemas de controle mais sofisticados e eficientes (Ma *et al.*, 2008).

A lógica fuzzy, introduzida por Zadeh (1965), emerge como uma ferramenta promissora para o controle de sistemas complexos caracterizados por incertezas, não-linearidades e informações imprecisas. Diferentemente dos sistemas de controle convencionais, que operam com valores exatos e lógica binária, os controladores fuzzy utilizam conjuntos difusos e regras linguísticas para modelar o conhecimento humano e tomar decisões em ambientes de incerteza (Ross, 2010). Esta abordagem permite uma modelagem mais próxima ao raciocínio humano, incorporando aspectos qualitativos e subjetivos no processo de controle.

A aplicação de controladores fuzzy em sistemas HVAC tem demonstrado resultados superiores em termos de eficiência energética e conforto térmico quando comparados aos controladores convencionais PID (Proportional-Integral-Derivative). Dounis e Caraiscos (2009) destacam que os sistemas fuzzy são particularmente adequados para controle de climatização devido à sua capacidade de processar informações linguísticas e modelar a percepção humana de conforto térmico. Além disso, Alcalá *et al.* (2005) enfatizam que os controladores fuzzy apresentam maior robustez diante de perturbações externas e variações nos parâmetros do sistema.

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo de sistema de controle fuzzy para gerenciamento automatizado da potência de aquecedores residenciais, utilizando temperatura ambiente e umidade relativa como variáveis de entrada. O objetivo principal é

desenvolver um controlador capaz de otimizar o consumo energético enquanto mantém condições adequadas de conforto térmico, contribuindo para a eficiência energética de sistemas residenciais de aquecimento.

## MÉTODOS

O desenvolvimento do sistema de controle fuzzy baseou-se na arquitetura clássica de Mamdani (Mamdani e Assilian, 1975), caracterizada pela utilização de regras linguísticas do tipo "SE-ENTÃO" e métodos de defuzzificação baseados no centro de gravidade. A estrutura geral do sistema compreende três etapas principais: fuzzificação das variáveis de entrada, processamento através do mecanismo de inferência, e defuzzificação para obtenção da saída crisp. Esta arquitetura foi escolhida devido à sua capacidade de incorporar conhecimento especialista de forma intuitiva e sua ampla aplicabilidade em problemas de controle (Jang *et al.*, 1997).

Foram definidas duas variáveis de entrada e uma variável de saída para o sistema de controle. A temperatura ambiente foi modelada no universo na faixa [0°C, 40°C], abrangendo a faixa típica de temperaturas internas residenciais durante o período de aquecimento. A umidade relativa foi definida no universo [0%, 100%], cobrindo toda a faixa possível desta variável. A potência do aquecedor, variável de saída do sistema, foi estabelecida no intervalo [0%, 100%], representando o percentual de potência máxima a ser aplicada pelo equipamento.

Para cada variável linguística, foram definidos três termos linguísticos (baixa, média, alta) modelados através de funções de pertinência triangulares. A escolha das funções triangulares justifica-se pela facilidade de ajuste dos parâmetros e adequação para modelagem de conhecimento especialista em sistemas de controle (Mendel, 1995). Para a temperatura ambiente, a função "baixa" foi definida com parâmetros [0, 0, 20], "média" com [15, 25, 35], e "alta" com [30, 40, 40]. A umidade relativa apresenta função "baixa" [0, 0, 50], "média" [30, 50, 70], e "alta" [60, 100, 100]. A potência do aquecedor segue distribuição similar: "baixa" [0, 0, 50], "média" [30, 50, 70], e "alta" [60, 100, 100].

A base de regras fuzzy foi desenvolvida considerando princípios físicos de transferência de calor e umidade, bem como critérios de conforto térmico estabelecidos na literatura

especializada. O conhecimento especialista foi incorporado através de sete regras de inferência que relacionam as condições ambientais com a potência necessária do aquecedor. A primeira regra estabelece que quando a temperatura é baixa e a umidade é alta, a potência deve ser alta, considerando que altas umidades intensificam a sensação de frio. A segunda regra mantém potência alta para temperatura baixa com umidade média, enquanto a terceira reduz para potência média quando ambas as variáveis (temperatura baixa e umidade baixa) não demandam aquecimento intensivo.

As regras quarta e quinta tratam de situações com temperatura média, estabelecendo potência média quando a umidade é alta ou média, respectivamente. A sexta regra define potência baixa para temperatura média com umidade baixa, considerando que essas condições proporcionam conforto térmico adequado com menor demanda energética. A sétima regra simplifica que quando a temperatura é alta, independentemente da umidade, a potência deve ser baixa, pois o ambiente já se encontra em condições de conforto térmico.

O mecanismo de inferência empregado baseia-se no método de Mamdani, utilizando operações de mínimo para implementação do operador de conjunção (E) e máximo para agregação das regras ativadas. Esta abordagem permite uma interpretação intuitiva das regras e facilita a validação do conhecimento especialista incorporado no sistema. A defuzzificação é realizada através do método do centro de gravidade (centroid), que calcula o valor crisp de saída como o centro de massa da área resultante da agregação das regras (Jang *et al.*, 1997). Este método garante uma saída suave e estável, características desejáveis em sistemas de controle.

A validação do modelo foi realizada através de simulações computacionais considerando diferentes cenários de temperatura e umidade, permitindo avaliar a adequação das regras fuzzy implementadas e o comportamento geral do controlador modelado. Um caso específico foi analisado em detalhes, considerando temperatura de 18°C e umidade de 65%, condições típicas que podem ocorrer em ambientes residenciais durante períodos de aquecimento. O código experimental desenvolvido serve como prova de conceito para futuras implementações em hardware real.



O código-fonte está disponível para download através do link: <https://github.com/vitor-souza-ime/fuzzy>.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação do sistema de controle fuzzy resultou em um controlador capaz de processar adequadamente as variáveis de entrada e fornecer saídas coerentes com os princípios de conforto térmico estabelecidos na literatura. A análise das funções de pertinência implementadas revela uma distribuição adequada dos termos linguísticos nos respectivos universos de discurso, conforme apresentado na Figura 1 que ilustra as três variáveis do sistema. Para a variável temperatura, observa-se uma sobreposição apropriada entre os conjuntos fuzzy adjacentes, permitindo transições suaves entre as categorias linguísticas. A função "baixa" domina o intervalo [0°C, 15°C], "média" apresenta maior pertinência entre [20°C, 30°C], e "alta" é predominante acima de 35°C.

A configuração das funções de pertinência para umidade relativa demonstra comportamento similar, com o conjunto "baixa" sendo mais significativo até 40%, "média" entre 40% e 60%, e "alta" acima de 60%. Esta distribuição está em concordância com as recomendações da ASHRAE (2017) para faixas de umidade em ambientes internos, que estabelece valores entre 30% e 60% como adequados para conforto térmico. A variável de saída, potência do aquecedor, apresenta distribuição simétrica que permite ajustes finos na resposta do sistema, desde operação mínima até potência máxima.

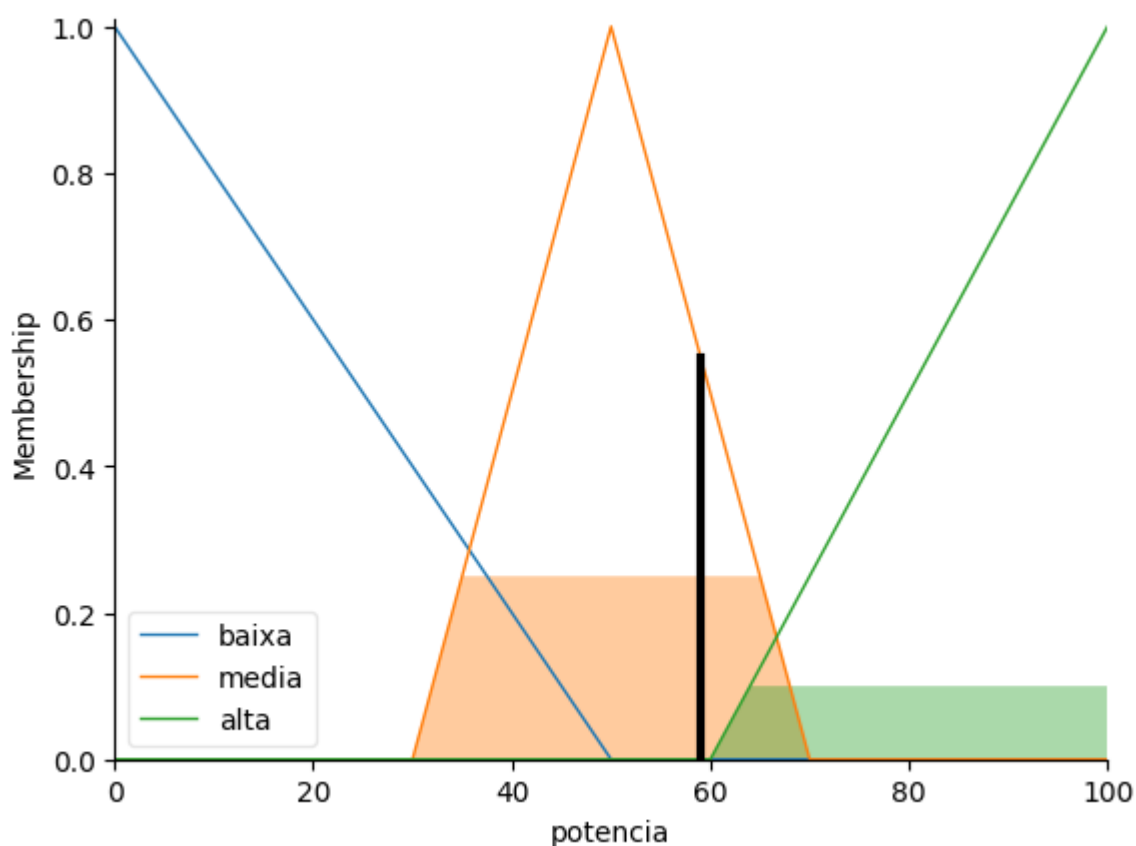
O teste do sistema com condições de entrada específicas (temperatura de 18°C e umidade de 65%) resultou em uma potência recomendada de 66,67%, valor que demonstra a capacidade do controlador em interpretar adequadamente as condições ambientais. Esta resposta é fisicamente coerente, considerando que a temperatura de 18°C encontra-se abaixo da faixa de conforto térmico (tipicamente entre 20°C e 24°C segundo Fanger, 1970) e a umidade de 65% está ligeiramente elevada, intensificando a sensação de frio e demandando maior potência de aquecimento.

A análise da ativação das regras fuzzy durante o processamento deste cenário específico revela que múltiplas regras contribuem para a saída final, característica fundamental dos sistemas fuzzy que proporciona robustez e suavidade na resposta. A regra "SE temperatura



é baixa E umidade é alta ENTÃO potência é alta" apresenta ativação significativa, assim como a regra "SE temperatura é média E umidade é alta ENTÃO potência é média", refletindo a posição intermediária da temperatura de 18°C entre as categorias "baixa" e "média".

Figura 1 - Resposta do controlador Fuzzy



Fonte: O autor.

O comportamento do sistema demonstra vantagens em relação aos controladores convencionais on/off tradicionalmente empregados em aquecedores residenciais. Enquanto controladores binários operam de forma abrupta, gerando oscilações na temperatura ambiente e consumo energético ineficiente, o controlador fuzzy proposto proporciona ajustes graduais e contínuos na potência, resultando em maior estabilidade térmica e potencial redução no consumo energético. Esta característica está em conformidade com as

observações de Dounis e Caraiscos (2009) sobre as vantagens dos sistemas fuzzy em aplicações HVAC.

A estrutura de regras implementada demonstrou capacidade de capturar adequadamente o conhecimento especialista sobre controle térmico residencial. A simplificação introduzida na sétima regra, que estabelece potência baixa sempre que a temperatura é alta, independentemente da umidade, mostrou-se eficaz para evitar superaquecimento do ambiente. Esta abordagem está alinhada com os princípios de eficiência energética, priorizando o não desperdício de energia quando as condições térmicas já são adequadas.

A implementação computacional utilizando Python e scikit-fuzzy provou ser eficiente e adequada para prototipagem de sistemas de controle fuzzy. A facilidade de modificação das funções de pertinência e regras permite ajustes finos no comportamento do controlador, característica importante para adaptação a diferentes tipos de ambiente e preferências dos usuários. Além disso, a visualização gráfica proporcionada pela biblioteca matplotlib facilita a análise e validação do sistema desenvolvido.

## **CONCLUSÕES**

Os resultados obtidos evidenciam que o controlador fuzzy é capaz de processar adequadamente as informações ambientais e fornecer saídas apropriadas para o controle de potência do aquecedor. A resposta do sistema para o cenário teste (temperatura de 18°C e umidade de 65% resultando em potência de 66,67%) demonstra a capacidade do controlador em interpretar condições que demandam aquecimento moderado a elevado, considerando tanto a temperatura ligeiramente baixa quanto a umidade elevada que intensifica a sensação de desconforto térmico.

As contribuições principais deste trabalho incluem a demonstração da aplicabilidade de controladores fuzzy em sistemas de aquecimento residencial simples, a definição de uma estrutura de regras baseada em conhecimento especialista sobre conforto térmico, e a validação computacional da abordagem proposta. O sistema desenvolvido apresenta potencial para contribuir com a eficiência energética de instalações residenciais, embora validações experimentais em ambientes reais sejam necessárias para quantificar precisamente os benefícios energéticos.

Recomenda-se para trabalhos futuros a implementação experimental do sistema em ambiente controlado, a incorporação de variáveis adicionais como temperatura externa e ocupação do ambiente, o desenvolvimento de algoritmos de aprendizado para ajuste automático das regras fuzzy, e a integração com sistemas de automação residencial mais amplos.

## REFERÊNCIAS

ALCALÁ, R.; CASILLAS, J.; CORDÓN, O.; HERRERA, F. A genetic rule weighting and selection process for fuzzy control of heating, ventilating and air conditioning systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 18, n. 3, p. 279-296, 2005.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). *ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta: ASHRAE, 2017.

DOUNIS, A. I.; CARAISCOS, C. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 6-7, p. 1246-1261, 2009.

FANGER, P. O. *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.

JANG, J. S. R.; SUN, C. T.; MIZUTANI, E. *Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997.

MA, Z.; WANG, S.; XU, X.; XU, F. A supervisory control strategy for building cooling water systems for practical and real time applications. *Energy Conversion and Management*, v. 49, n. 1, p. 2324-2336, 2008.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, v. 7, n. 1, p. 1-13, 1975.

MENDEL, J. M. Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. *Proceedings of the IEEE*, v. 83, n. 3, p. 345-377, 1995.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, v. 40, n. 3, p. 394-398, 2008.

ROSS, T. J. *Fuzzy logic with engineering applications*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2010.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.