

Sistema Embarcado Baseado em Lógica Fuzzy para Análise da Qualidade do Ar em Ambientes Internos

Antônio Carlos P. de S. Júnior¹, Elton R. Alves², Warley M. Valente Júnior²,
Adam D. Santos², Haroldo G. B. Filho³

¹Universidade Federal do Pará (UFPA)
Tucuruí – PA – Brasil

²Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA)
Marabá – PA – Brasil

³Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
São Luís – MA – Brasil

antonio.junior@tucuruui.ufpa.br, adam.dreyton@gmail.com,
{eltonalves, wmvj}@unifesspa.edu.br, haroldo.gbf@ufma.br

Abstract. *This paper proposes an embedded system based on fuzzy logic for indoor air quality assessment, integrating environmental sensors and a humidifier as an actuator. Environmental data collected in a classroom were processed by a fuzzy model validated against a traditional PID controller. The results obtained in the specific test environment indicate that, for the variables addressed, the fuzzy approach demonstrated a lower variability compared to the PID. While the PID remains a valid control method, the fuzzy system maintained 90.58% of samples above the comfort threshold, whereas the PID achieved 47.91% under the same conditions. These findings suggest that, for the studied scenario, the fuzzy logic provided a suitable response in regulating microclimate conditions.*

Resumo. *Este artigo propõe um sistema embarcado baseado em lógica fuzzy para a avaliação da qualidade do ar interno, integrando sensores ambientais e um umidificador como atuador. Dados coletados em sala de aula foram processados por um modelo fuzzy validado em comparação a um controlador PID tradicional. Os resultados obtidos no ambiente de teste específico indicam que, para as variáveis abordadas, a abordagem fuzzy apresentou uma menor variabilidade em relação ao PID. Embora o PID se mantenha como um método de controle válido, o sistema fuzzy manteve 90,58% das amostras acima do limiar de conforto, frente a 47,91% do PID sob as mesmas condições. Os achados sugerem que, para o cenário e as variáveis analisadas, a lógica fuzzy apresentou uma resposta condizente com as necessidades de regulação do microclima.*

1. Introdução

A qualidade do ar é um pilar essencial do bem-estar social, mas vem se degradando com o avanço industrial e a dependência de combustíveis fósseis. Episódios históricos de poluição extrema, como o Smog de Londres de 1952, impulsionaram marcos regulatórios internacionais; contudo, o problema permanece em escala global. Relatórios recentes da Organização Mundial da Saúde indicam que quase toda a população mundial vive em

áreas com níveis de poluentes acima dos considerados seguros, o que resulta em milhões de mortes prematuras anuais [World Health Organization 2024]. Diante desse cenário, torna-se crucial adotar soluções tecnológicas inovadoras para mitigar esse quadro.

A poluição atmosférica representa um desafio crítico de saúde pública, especialmente em metrópoles brasileiras onde os limites de emissão são constantemente excedidos, afetando severamente grupos vulneráveis [World Health Organization 2024]. Segundo a Organização Mundial da Saúde, a exposição prolongada a poluentes atmosféricos está associada ao aumento de doenças respiratórias, cardiovasculares e à mortalidade prematura. Nesse cenário, a integração de sensores de baixo custo com inteligência computacional surge como uma estratégia viável para a gestão urbana, permitindo análises adaptativas que consideram variações sazonais e as incertezas técnicas desses dispositivos no contexto de cidades inteligentes [Silva et al. 2023], [Ferreira et al. 2025].

Essa necessidade tecnológica estende-se com urgência aos ambientes internos, como salas de aula, onde a composição do ar impacta diretamente a saúde e o desempenho intelectual. A exposição ao material particulado ($PM_{2,5}$) e ao CO_2 está correlacionada ao aumento de patologias respiratórias e ao declínio de funções cognitivas, como atenção e memória operacional [Xu et al. 2024]. Portanto, o monitoramento inteligente nesses espaços é fundamental para garantir não apenas o bem-estar físico, mas também a eficácia do processo de aprendizagem.

Para enfrentar esses desafios, este trabalho apresenta um sistema embarcado que utiliza um umidificador como atuador para o controle da qualidade do ar. O dispositivo emprega lógica *fuzzy* em plataforma Arduino para a automação do conforto térmico, sendo validado por meio de uma análise comparativa com o controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID), método canônico na literatura. Além disso, aplicou-se o processo de Extração, Transformação e Carga (ETL) para o armazenamento e a análise das variáveis ambientais em um repositório *online*.

Este artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta a fundamentação teórica, abordando os conceitos relevantes para o estudo. A Seção 3 discute os trabalhos relacionados. A Seção 4 descreve a metodologia utilizada no desenvolvimento do sistema embarcado. Resultados e a discussão são apresentados na Seção 5, seguidos pelas considerações finais e sugestões para trabalhos futuros na Seção 6.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Lógica Fuzzy

A lógica fuzzy tem se mostrado uma ferramenta eficaz para o monitoramento da qualidade do ar, pois lida bem com incertezas e sistemas complexos. Ao contrário da lógica booleana, que utiliza valores binários (0 ou 1), a lógica fuzzy permite atribuir graus de pertinência a variáveis dentro de um intervalo contínuo de 0 a 1 [Zadeh 1965]. Isso possibilita modelar transições graduais, como a variação da qualidade do ar entre ruim, moderada e boa, por exemplo.

As transições graduais são representadas por funções de pertinência, que atribuem um grau de pertinência a cada valor numérico e podem assumir formas como triangular, trapezoidal ou gaussiana. Essas funções capturam a incerteza dos dados e, por meio da inferência fuzzy, combinam informações com regras predefinidas para gerar respostas.

A defuzzificação converte a saída fuzzy em um valor real, sendo o método do centro de gravidade uma abordagem comum para esse processo, amplamente aplicada em sistemas de monitoramento e automação [Chiu 2018].

A lógica fuzzy é eficaz no monitoramento da qualidade do ar, pois avalia variáveis imprecisas e se adapta a diferentes contextos, permitindo uma gestão mais eficiente da poluição [Souza 2024]. Sua capacidade de representar transições graduais é essencial em aplicações onde as condições variam continuamente [Santos and Silva 2019]. Comparada às redes neurais, destaca-se por seu processamento mais leve e por sua capacidade de lidar com incertezas sem exigir grandes volumes de dados, tornando-se uma solução prática e expansível [Souza 2021].

2.2. Qualidade do Ar Interno

A qualidade do ar em ambientes internos é determinante para a saúde dos ocupantes em espaços de longa permanência, como escolas e escritórios. A interação entre ventilação ineficiente e emissões provenientes de materiais ou agentes de limpeza pode elevar a carga de poluentes, resultando em patologias respiratórias, fadiga e declínio da produtividade. Assim, o controle atmosférico interno torna-se uma prioridade estratégica para assegurar o bem-estar e o desempenho dos usuários [Morawska et al. 2024].

Para classificar a qualidade do ar em ambientes internos, pode-se utilizar o Índice de Qualidade do Ar (IQA), que mede a concentração de poluentes como CO₂, CO, material particulado e compostos orgânicos voláteis. Embora o IQA seja amplamente utilizado para o monitoramento do ar externo, ele pode ser adaptado para espaços fechados, considerando os poluentes específicos presentes nesses ambientes [Cao et al. 2019]. O IQA quantifica a qualidade do ar em uma escala de 0 a 300, onde valores mais altos indicam maior poluição e risco à saúde [Instituto Ar 2024]. Ele é dividido em cinco categorias: “Boa” (0–50), “Regular” (51–100), “Inadequada” (101–199), “Ruim” (200–299) e “Péssima” (acima de 300), que refletem diferentes níveis de impacto à saúde.

Em modelos de lógica *fuzzy*, os valores do IQA são normalizados entre 0 e 1 para integração com as funções de pertinência. A definição dos pesos das variáveis baseia-se em uma matriz de comparação par a par, construída a partir de julgamentos de especialistas ou de dados de pesquisa. Essa análise hierárquica permite decompor o problema em componentes fundamentais, facilitando a compreensão das interações e o cálculo do índice, conforme a Equação 1:

$$IQA = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \mu_i(x_i), \quad (1)$$

onde o IQA considera o número de variáveis analisadas (n), seus respectivos pesos (w_i) e o grau de pertinência de cada variável ao seu conjunto fuzzy correspondente ($\mu_i(x_i)$). Esses fatores, aplicados a variáveis como poluentes, temperatura, umidade e ventilação, permitem determinar um valor numérico que reflete a qualidade geral do ar interno.

A aplicação da lógica *fuzzy* no cálculo do IQA categoriza os poluentes em conjuntos de pertinência, mitigando as incertezas dos dados ambientais [Zhao et al. 2022]. De acordo com especialistas na literatura, o mapeamento dessas variáveis apoia-se em métricas consolidadas de desempenho atmosférico [Shoukry et al. 2024]. Neste traba-

lho, o termo “conforto” é utilizado para derivar o IQA, integrando o bem-estar térmico à pureza do ar interno por meio da inferência *fuzzy* [Dionova et al. 2020].

3. Trabalhos Relacionados

Na literatura, soluções para o controle da qualidade do ar em ambientes internos variam entre métodos baseados em limiares fixos e o uso de inteligência artificial. Abordagens fundamentadas em limites de segurança, como as discutidas em [Aouani et al. 2023] e [Afrial et al. 2025], utilizam redes de sensores para o acionamento de sistemas de ventilação em tempo real. Em complemento, a aplicação de lógica *fuzzy* e algoritmos genéticos tem sido explorada para otimizar a climatização [Mudholkar and Patil 2019, Bushnag 2022], indicando que o ajuste dinâmico de parâmetros pode favorecer a eficiência energética e a percepção térmica no ambiente.

No que concerne ao hardware, a literatura atual enfatiza a convergência entre a Internet das Coisas (IoT) e o processamento local para respostas autônomas. Estudos recentes propõem arquiteturas integradas para o controle direto de atuadores [Kovács and Both 2024], enquanto estudos como de [Meneses-Albala et al. 2025] validam o emprego de microcontroladores e sensores de baixo custo para o monitoramento ambiental. Essas configurações demonstram viabilidade técnica para capturar variações na qualidade do ar com confiabilidade, permitindo intervenções diretas no próprio ambiente monitorado.

Diferenciando-se de abordagens limitadas a simulações ou ambientes controlados, este estudo implementa um sistema inteligente no cenário dinâmico de uma sala de aula real. O diferencial da solução é a sua autonomia local, na qual o próprio microcontrolador processa as variáveis em tempo real, aplicando lógica *fuzzy* para acionar um umidificador de ar, eliminando a dependência de computadores externos para o controle. Como complemento analítico, um processo de ETL estrutura e armazena o histórico de dados na nuvem, facilitando a visualização e o monitoramento contínuo do ambiente.

4. Metodologia

Para solucionar o problema de forma eficaz, adotou-se uma abordagem explicativa, conforme as recomendações metodológicas de [Prodanov and Freitas 2013], focando na criação de modelos e experimentos para a avaliação da qualidade do ar em ambientes internos. A pesquisa seguiu um método experimental, com a coleta de variáveis relacionadas ao ar, a fim de fundamentar a solução proposta. A Figura 1 ilustra as etapas de elaboração da pesquisa até a validação do sistema.

A pesquisa envolveu a revisão da literatura para a definição das variáveis e dos métodos, seguida pela modelagem *fuzzy* e pelo desenvolvimento de hardware com sensores conectados a um microcontrolador. Os testes foram aplicados em um ambiente de sala de aula escolar na Escola Eurídice Neiva Bezerra, localizada em São Geraldo do Araguaia, no estado do Pará, e compreenderam a captação de dados nesse local, tanto em salas vazias quanto em salas com pessoas. Os dados coletados passaram por pré-processamento antes da implementação do software back-end.

4.1. Visão Geral do Sistema

A Figura 2 apresenta a visão geral do sistema proposto, ilustrando todos os seus componentes principais e a interação entre eles.

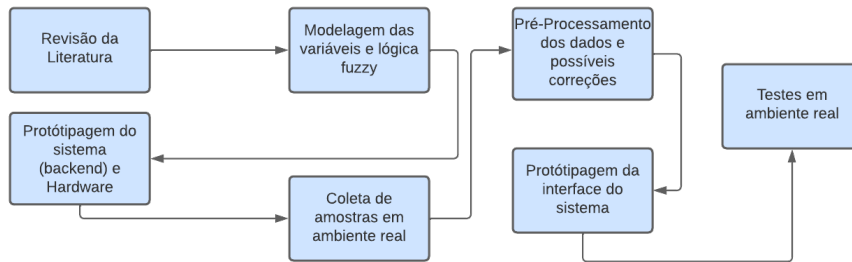


Figura 1. Etapas do processo de metodologia

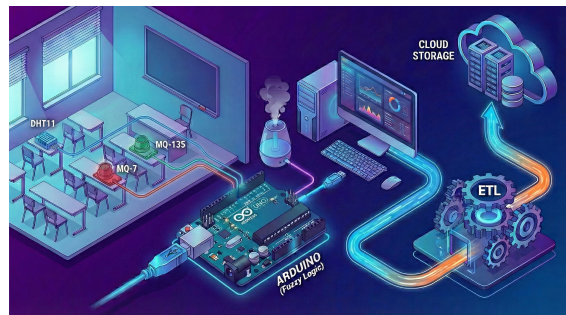


Figura 2. Visão geral do sistema

O sistema desenvolvido utiliza sensores para capturar dados da qualidade do ar em uma sala de aula. Foram utilizados os sensores DHT11 (temperatura e umidade), MQ-135 (CO₂) e MQ-9 (CO), conectados ao Arduino. O microcontrolador processa essas informações em tempo real, aplicando a lógica *fuzzy*, e controla um umidificador de ar, que atua diretamente como o dispositivo de resposta (atuador) do sistema. Simultaneamente, o Arduino envia os dados para um computador. Na etapa de ETL, os dados são extraídos, transformados e carregados para a nuvem, permitindo a organização, o tratamento e o monitoramento contínuo do ambiente.

4.2. Projeto do Controlador Fuzzy e Comparação PID

A lógica fuzzy foi implementada no Arduino em C++ com a biblioteca *fuzzy.h* para processar os dados dos sensores e gera um índice de conforto ambiental. A Tabela 1 descreve as variáveis utilizadas, correspondentes aos dados dos sensores e derivadas do IQA.

Tabela 1. Faixas de variáveis utilizadas no controle da qualidade do ar.

| Variável | Faixa 1 | Faixa 2 | Faixa 3 |
|-----------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------|
| Temperatura (°C) | Frio (≤ 15) | Boa (18-25) | Calor (≥ 28) |
| Umidade (%) | Baixa (< 30) | Boa (40-70) | Elevada (> 70) |
| CO ₂ (ppm) | Bom (0-800) | Alto (600-1000) | Perigo (1200-2000) |
| CO (ppm) | Bom (0-4) | Alto (3-9) | Perigo (8-12) |
| Conforto | Desconfortável (0-50) | Confortável (40-80) | Muito Confortável (> 70) |

Foram especificados três valores linguísticos para temperatura, umidade, CO₂, CO e conforto térmico. As variáveis de entrada ficaram da seguinte forma: Tempera-

tura: {Frio, Boa e Calor}, Umidade: {Baixa, Boa e Elevada}, Concentração de CO₂: {Bom, Alto e Perigo} e Concentração de CO: {Bom, Alto e Perigo}. Enquanto isso, a variável de saída ficou definida como: Conforto: {Desconfortável, Confortável e Muito Confortável}. A Figura 3 apresenta as funções de pertinência utilizadas para as variáveis de entrada do sistema.

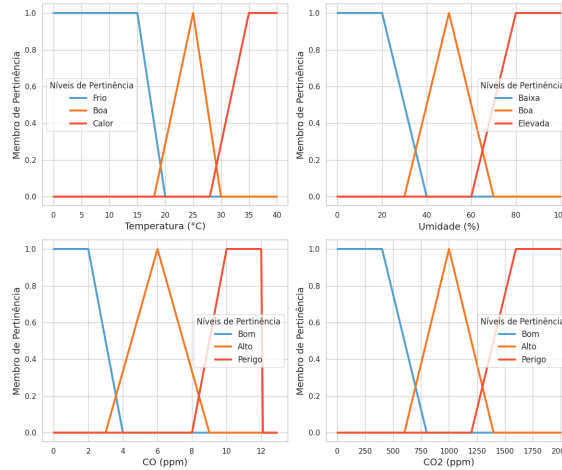


Figura 3. Funções de pertinência do sistema fuzzy

O sistema foi configurado com um total de 81 regras *fuzzy*, abrangendo todas as combinações possíveis das variáveis de entrada. As regras foram formuladas para refletir as interações complexas entre temperatura, umidade, CO₂ e CO, garantindo uma avaliação robusta e precisa da qualidade do ar. Para a definição das regras *fuzzy*, foi utilizado o método de Mamdani, que permite uma representação eficiente e interpretável das relações entre as variáveis. Assim, um exemplo de regra definida para o sistema é:

SE temperatura é boa **E** umidade é baixa **E** é CO₂ perigo **E** CO é perigo **ENTÃO** conforto é desconfortável.

Na definição da regra composicional de inferência para o controlador, adotou-se a composição *max-min* e a defuzzificação pelo centro de gravidade. Os valores *fuzzy* são normalizados no intervalo contínuo de 0 a 1, conforme evidenciado na Seção 5. O desempenho do controlador *fuzzy* será comparado ao PID discreto da Equação 2:

$$u[k] = K_p e[k] + K_i T_s \sum_{i=0}^k e[i] + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s}, \quad (2)$$

em que n é o número de variáveis analisadas, w_i são seus respectivos pesos e $\mu_i(x_i)$ representa o grau de pertinência de cada variável ao conjunto *fuzzy*. Para comparação com o controlador PID discreto, adotaram-se, com base em testes preliminares, os ganhos $K_p = 1,0$, $K_i = 0,1$ e $K_d = 0,05$, permitindo avaliar o desempenho relativo entre as estratégias de controle.

4.3. Ferramentas Utilizadas

O processamento dos dados emprega a linguagem Python com as bibliotecas Pandas (análise), PySerial (comunicação) e CSV (armazenamento), além dos módulos Time e

Datetime para gestão temporal, possibilitando a coleta e a organização eficiente dos registros ambientais monitorados. No nível de hardware, o monitoramento utiliza o sensor DHT11 (temperatura e umidade) e os módulos MQ-9 e MQ-135 (CO e CO₂) integrados a um Arduino, que processa as leituras e atua no ambiente por meio de um servo motor para o controle físico de um umidificador, conforme ilustrado na Figura 4.

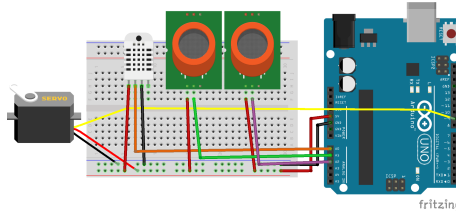


Figura 4. Esquema de prototipagem do sistema

Na etapa de extração, o Arduino transmitiu as leituras dos sensores via comunicação serial para um computador. Em seguida, a etapa de transformação utilizou a biblioteca pandas para limpar, validar e normalizar as informações. Por fim, os dados foram carregados no Google Sheets por meio da Google Cloud Platform API, permitindo a visualização interativa e o monitoramento em tempo real através do Streamlit.

5. Resultados

O sistema foi avaliado em quatro fases entre 2024 e 2025, com amostragem de um dado por minuto. As etapas iniciais (2024) estabeleceram uma linha de base em sala vazia e, posteriormente, em uma sala de aula ocupada por cerca de 22 alunos, validando o armazenamento em nuvem sob janelas de 5,5 horas (330 amostras/dia). Em 2025, a terceira fase introduziu um umidificador como atuador e comparou a eficiência entre a lógica *fuzzy* e o controle PID, enquanto a etapa final estendeu o monitoramento para 11,5 horas diárias (690 amostras). Para sintetizar os resultados neste texto, as análises foram organizadas em duas perspectivas principais: o impacto da introdução do umidificador e a comparação entre os controladores *fuzzy* e PID.

As métricas estatísticas evidenciam inicialmente a redução da variabilidade do sistema após a integração do atuador. A Tabela 2 apresenta a diminuição das oscilações e da energia do sinal, indicando uma operação mais estável e uniforme no ambiente monitorado.

Tabela 2. Comparativo das métricas estatísticas antes e depois do umidificador.

| Métrica | Antes | Depois |
|------------------|-------|--------|
| Desvio padrão | 0,14 | 0,05 |
| Amplitude | 0,60 | 0,18 |
| Energia do sinal | 91,06 | 76,98 |

Após a análise quantitativa das métricas, observa-se também uma alteração significativa no comportamento dinâmico do microclima interno. A implementação do umidificador elevou os níveis de conforto e reduziu as oscilações em comparação ao monitoramento passivo inicial. Antes da intervenção, o sistema apresentava variações mais acentuadas; contudo, a ativação do atuador promoveu uma regulação mais constante, com

valores mais concentrados em uma faixa de operação definida. A Figura 5 ilustra esse comportamento, evidenciando a transição de um estado de instabilidade para um cenário de maior equilíbrio térmico no ambiente.

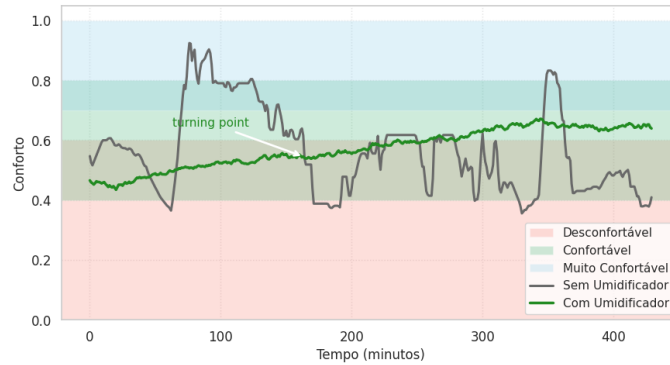


Figura 5. Comparação do ambiente antes e depois da implementação do umidificador

A comparação entre os controladores indica comportamentos distintos na evolução da variável conforto. O sistema baseado em lógica *fuzzy* apresentou trajetória gradual, com estabilização próxima de 0,6 e oscilações reduzidas. Em contrapartida, o controle PID exibiu maior sensibilidade inicial, com flutuações mais frequentes antes de estabilizar em torno de 0,54, caracterizando diferentes adaptações às condições dinâmicas do ambiente monitorado, conforme ilustrado na Figura 6.

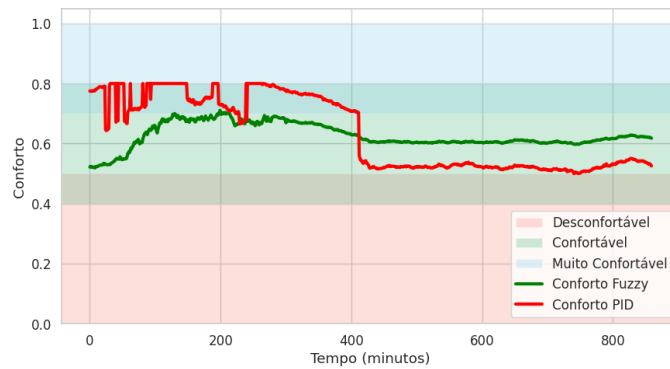


Figura 6. Variação da variável conforto conforme a saída dos sistemas fuzzy e PID

Os indicadores estatísticos resumidos na Tabela 3 detalham o comportamento de cada controlador durante o experimento. Além da variabilidade, os dados de energia indicam o esforço de controle acumulado, sugerindo que a resposta do sistema *fuzzy* exigiu menor intensidade de correções para a manutenção do conforto.

Tabela 3. Comparação dos indicadores quantitativos entre os sistemas Fuzzy e PID.

| Indicador | PID | Fuzzy |
|---------------------------|------------|--------------|
| Desvio padrão | 0,12 | 0,04 |
| Amplitude | 0,30 | 0,19 |
| Energia do sinal | 360,21 | 339,25 |
| Amostras acima de 0,6 (%) | 47,91 | 90,58 |

As métricas estatísticas confirmam a redução da variabilidade do sistema após a integração do atuador. A Tabela 2 apresenta a diminuição das oscilações e da energia do sinal, indicando uma operação mais uniforme.

6. Conclusão

Este estudo apresentou um sistema embarcado e inteligente para controle da qualidade do ar interno via lógica *fuzzy*, monitorando temperatura, umidade, CO e CO₂. A validação em salas de aula reais indicou que a abordagem difusa proporcionou uma resposta com menor variabilidade em relação ao controle PID. A automação com umidificador consolidou a solução como uma alternativa de baixo custo e replicável para a regulação climática autônoma em ambientes internos e dinâmicos.

Trabalhos futuros preveem a inclusão de material particulado (PM_{2,5}), a integração de novos atuadores, como sistemas de ventilação ou exaustão para a mitigação direta de gases, e o desenvolvimento de modelos *neuro-fuzzy* via IoT. Tais avanços permitirão ampliar ainda mais a precisão e a inteligência do sistema, fornecendo uma ferramenta ainda mais robusta e flexível para o monitoramento e o controle da qualidade do ar em ambientes internos.

Referências

- Afriyal, M., Rauf, M., Nouman, M., Talal Khan, M., Rizwan, M. A., and Ahmad, N. (2025). Multi-sensor indoor air quality monitoring with real-time logging and air purifier integration. *Materials Proceedings*, 23(1):12.
- Aouani, N., Hervé, A., and Nefzaoui, E. (2023). Iot-based indoor air quality monitoring and analysis under different strategies of covid-19 transmission mitigation: a field experiment. In *2023 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment (MetroLivEnv)*, pages 1–6. IEEE.
- Bushnag, A. (2022). An improved air quality and climate control monitoring system using fuzzy logic for enclosed areas. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(5):6339–6347.
- Cao, X., Li, X., and Wang, B. (2019). Indoor air quality and health: A review of recent literature. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(30):31544–31556.
- Chiu, S. H. (2018). *Fuzzy logic: intelligence, control, and information*. Wiley-Interscience, Hoboken, NJ.
- Dionova, B. W., Mohammed, M. A., Al-Zubaidi, S., and Yusuf, E. (2020). Environment indoor air quality assessment using fuzzy inference system. *ICT Express*, 6(3):185–194.

- Ferreira, L. et al. (2025). Seasonal variations and low-cost sensor calibration in urban environments. *Climate*, 13(4).
- Instituto Ar (2024). Qual a qualidade do ar que respiramos?
- Kovács, L. and Both, C. B. (2024). Iot and machine learning-based system for predicting, monitoring and controlling indoor air quality. In *2024 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*, pages 1–6. IEEE.
- Meneses-Albala, E., Montalban-Faet, G., Felici-Castell, S., Perez-Solano, J. J., and Fayos-Jordan, R. (2025). Assessment of a multisensor zphs01b-based low-cost air quality monitoring system: Case study. *Electronics*, 14(8):1531.
- Morawska, L. et al. (2024). Mandating indoor air quality for public buildings. *Science*, 383(6688):1177–1179.
- Mudholkar, R. and Patil, C. (2019). Design and implementation of genetic fuzzy controller for split air-conditioner control based on fanger’s pmv index. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 27(4):1–12.
- Prodanov, E. V. and Freitas, E. C. (2013). *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas de pesquisa e projetos de pesquisa*. Editora Atheneu.
- Santos, L. R. and Silva, T. R. (2019). Lógica fuzzy aplicada à avaliação da qualidade do ar na cidade de são paulo. *Revista Brasileira de Engenharia e Tecnologia*, 11(3):202–210.
- Shoukry, F., Goubran, S., and Tarabieh, K. (2024). Enhanced indoor air quality dashboard framework and index for higher educational institutions. *Buildings*, 14(6):1640.
- Silva, A. et al. (2023). Monitoramento de poluentes em cidades inteligentes utilizando machine learning e sensores de baixo custo. In *Anais do Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais (WCAMA)*. SBC.
- Souza, G. S. e. (2024). Lógica fuzzy aplicada à avaliação da qualidade do ar na cidade de são paulo. Master’s thesis, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba. Orientador: José Arnaldo Frutuoso Roveda. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental).
- Souza, L. d. (2021). Lógica fuzzy e suas aplicações.
- World Health Organization (2024). Ambient (outdoor) air pollution. Acessado em: 24 fev. 2026.
- Xu, J. et al. (2024). Impact of indoor air quality on cognitive performance in educational environments. *Environmental Science & Technology*.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3):338–353.
- Zhao, L., Huang, S., Xu, J., and Yao, Y. (2022). Indoor air quality assessment and control using fuzzy inference. In *2022 IEEE 10th International Conference on Smart City and Informatization (iSCI)*, pages 63–68. IEEE.