

IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE FUZZY EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

José Hélio Bento da Silva¹, Laís Araújo Manguiera², Eduardo Wanderley Nobrega³
Victor Luiz dos Santos⁴, Heber Pimentel Gomes⁵, Juan Moises Mauricio Villanueva⁶

^{1,2,3} Discentes da Universidade Federal da Paraíba, Brasil. jose.dasilva@estudante.cear.ufpb.br,
lais.manguiera@estudante.cear.ufpb.br, edu.nobrega@estudante.cear

⁴ Engenheiro da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba, PB, Brasil. victor.santos@cagepa.pb.gov.br

^{5,6} Professor da Universidade Federal da Paraíba, Brasil. heberp@uol.com.br, jmauricio@cear.ufpb.br.

RESUMO – Embora os sistemas de controle sejam fundamentais para garantir eficiência operacional, muitos sistemas de abastecimento de água carecem de modelos adequados, gerando perdas de carga e ineficiência energética. Devido ao comportamento dinâmico desses sistemas, controladores convencionais podem apresentar limitações para garantir um desempenho operacional ótimo. A inteligência artificial, especialmente controladores baseados em lógica Fuzzy, destaca-se por sua eficácia em plantas não lineares. A modelagem de sistemas de abastecimento é desafiadora, exigindo abordagens como caixa-preta com inteligência artificial. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi criar um controlador de pressão Fuzzy para um sistema de abastecimento de água, utilizando uma planta piloto do Laboratório de Eficiência Energética em Hidráulica e Saneamento. A metodologia incluiu coleta de dados, modelagem do sistema, projeto do controlador Fuzzy e implementação. Na validação do controle, a análise da eficiência energética demonstrou uma economia de 15,15% em relação à operação em malha aberta. Assim, este trabalho reforça a importância da integração de técnicas de controle aplicadas ao setor de distribuição de água.

Palavras-chave: Sistemas de Abastecimento de Água, Eficiência Energética, Controlador Fuzzy, Pressão, Vazão.

ABSTRACT – Although control systems are fundamental for ensuring operational efficiency, many water supply systems lack adequate models, resulting in head losses and energy inefficiency. Due to the dynamic behavior of these systems, conventional controllers may present limitations in achieving optimal operational performance. Artificial intelligence, especially controllers based on Fuzzy logic, stands out for its effectiveness in nonlinear plants. Modeling water supply systems is challenging and often requires black-box approaches supported by artificial intelligence. In this context, the objective of this work was to develop a Fuzzy pressure controller for a water supply system, using a pilot plant from the Laboratory of Energy Efficiency in Hydraulics and Sanitation. The methodology included data collection, system modeling, Fuzzy controller design, and implementation. During control validation, the analysis of energy efficiency demonstrated a 15.15% savings compared to open-loop operation.

Thus, this work reinforces the importance of integrating advanced control techniques in the water distribution sector.

Keywords: Water Supply Systems, Energy Efficiency, Fuzzy Controller, Pressure, Flow rate.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, destaca-se, atualmente, a necessidade de priorizar o sistema de abastecimento de água. Para lidar com essa questão, a Lei 14.026 determina que, até 2033, 99 % da população deve ter acesso à água potável, enquanto 90% deve ser beneficiada com coleta e tratamento de esgoto. Além disso, a lei estabelece a meta de reduzir as perdas na distribuição de água para 25% [1]. No entanto, o país ainda enfrenta um grande desafio, pois, conforme o estudo de perdas de água do Instituto Trata Brasil (baseado no SNIS 2022), 37,78% da água tratada é perdida no sistema de distribuição antes de chegar ao consumidor [2]. Concomitantemente a esses fatores, o consumo de energia elétrica em 2022, que representa um dos principais custos operacionais dos serviços de água e esgoto, apresentou um aumento de 0,1% em relação a 2021, atingindo a marca de 12,6 TWh [4]. Diante desse cenário de perdas e aumento de custos, torna-se imprescindível adotar soluções que promovam maior eficiência na operação dos sistemas de abastecimento de água.

Nesse sentido, [4] e [5] ressaltam a importância da eficiência energética para reduzir os custos com energia elétrica na operação e manutenção dos equipamentos dos sistemas de abastecimento de água. Assim, abordagens com a aplicação da inteligência artificial e controle avançado, buscam aumentar a confiabilidade operacional e contribuir para a sustentabilidade ambiental. Estudos recentes têm explorado diversas estratégias para enfrentar desafios específicos neste domínio.

Com base nesse cenário, alguns métodos de controle ganham destaque em aplicações não lineares e de elevada complexidade, tais como aplicação da lógica Fuzzy, no qual é proposto um sistema de controle de pressão para uma rede de distribuição de água, utilizando modelagem baseada em redes neurais artificiais e controle fuzzy [6]. Assim, o controlador Fuzzy, desenvolvido em Python, atua nos inversores de frequência responsáveis pelo controle da pressão, utilizando protocolos de comunicação como Modbus TCP e HTTP. Embora tenha melhorado a estabilidade da pressão e a eficiência energética, foram observadas limitações relacionadas à comunicação com o sistema supervisor.

Em outra análise é proposto uma técnica de controle utilizando um controlador ARX desenvolvido a partir de um banco de dados construído com um controlador primário Fuzzy [7]. Embora tenha apresentado bom desempenho na estabilização das pressões de serviço, a necessidade de um banco de dados extenso e a complexidade do processo de modelagem computacional podem representar desafios.

Em paralelo a essa análise, é possível aplicar soluções por meio das redes neurais artificiais, no qual é proposto um sistema de controle inteligente para sistemas de bombeamento em abastecimento de água, utilizando redes neurais artificiais, especificamente a Rede Perceptron

Multicamadas (PMC) [8]. Apesar de apresentar um desempenho satisfatório, a falta de uma regra clara para determinar o número ideal de neurônios na camada oculta pode ser uma limitação.

Tal problemática também pode ser solucionada com o viés do controle adaptativo, no qual é desenvolvido um sistema de controle adaptativo indireto, denominado IMRAC-PID-MCC, para controlar a pressão hidráulica em sistemas de abastecimento de água. O método utiliza a Máxima Correntropia para identificação em tempo real do sistema e atualização dos parâmetros do controlador PID [9]. Apesar de eficaz no rastreamento da pressão desejada, sua complexidade de implementação pode ser uma limitação.

Em outra análise, foi desenvolvido um modelo de Rede Neural Artificial para controlar a pressão de serviço em uma bancada experimental que simula um sistema de abastecimento de água, capaz de atender duas regiões com topografia distinta. O objetivo principal desse desenvolvimento é reduzir o desperdício e melhorar a eficiência energética [10]. Nesse contexto, é realizado um estudo comparativo em diferentes cenários do Consumo Específico de Energia Elétrica (CE), que serve como um indicador industrial de eficiência, relacionando o consumo de energia à quantidade de produção gerada. Dessa maneira, o controle proposto garantiu a redução do gasto energético do sistema ao mesmo tempo em que foi realizado o controle das pressões.

Nesse sentido, o problema do excesso de pressão em sistemas de abastecimento de água pode ser solucionado utilizando controladores fuzzy aplicados a motores-bombas para otimizar o controle da pressão e reduzir o consumo energético [11]. O trabalho demonstra que o uso do controle fuzzy no ajuste da operação das bombas resulta em uma redução significativa no consumo de energia, com um índice de economia de 23%. Essa abordagem também melhora a eficiência operacional, oferecendo uma alternativa eficaz para gerenciar redes de distribuição de água, especialmente em áreas com frequentes variações de demanda.

Entretanto, apesar dos avanços tecnológicos, muitos sistemas de abastecimento de água, essenciais para a sociedade, carecem atualmente de um sistema de controle adequado, resultando em perdas de carga no processo e ineficiência energética. Diante desse cenário, as perdas no Sistema de Abastecimento de Água são classificadas em dois tipos distintos: perdas aparentes e perdas reais, sendo neste caso estabelecido a relação entre a eficiência das redes de distribuição de água com a fatores como vazamentos, degradação da infraestrutura, consumo energético dos conjuntos motor-bomba, bem como o controle preciso da pressão e vazão [12]. Destaca-se ainda que tais parâmetros podem ser eficientemente gerenciados por meio do controle da velocidade dos conjuntos motor-bomba.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é comparar o desempenho de um sistema de controle, desenvolvido a partir do controle de pressão da malha, implementado em uma planta piloto disponível no Laboratório de Eficiência Energética em Hidráulica e Saneamento (LENHS/UFPB). Para este propósito, será avaliada a eficiência energética do sistema de bombeamento com controle e sem controle de pressão. Assim, a partir de testes de avaliação

realizados em diferentes cenários, observou-se uma economia energética de 15,15% em relação à operação em malha aberta.

Este trabalho está organizado em cinco seções: a Seção 2 descreve a metodologia proposta para modelagem, projeto do controlador, avaliação e implementação. Na Seção 3, são apresentados e discutidos os resultados. Finalmente, a Seção 4 conclui o artigo.

2. METODOLOGIA

Este trabalho propõe uma metodologia de implementação e análise do sistema, conforme ilustrado na Figura 1, o qual permite a identificação de melhorias contínuas ao longo das etapas, desde a coleta e modelagem dos dados até a avaliação do desempenho do controlador em diferentes cenários. A análise comparativa entre os cenários de malha aberta e fechada permite evidenciar os benefícios do controle automático, destacando a importância da abordagem adotada para otimizar o uso de energia e melhorar a competitividade do sistema industrial.



Figura 1 - Metodologia Proposta

Fonte: do Autor

A implementação do sistema proposto foi realizada com base na bancada experimental ilustrada na Figura 2. Nesse contexto, o projeto do controlador, baseado na Lógica Fuzzy, tem como base o controle da pressão - PT-2 - a partir dos dados fornecidos pela válvula de controle de fluxo - CV-1 - aliado ao sensor de vazão FT-1. Assim, a partir da coleta de dados, implementação do controle e comparativo com os resultados obtidos dos sistemas em malha aberta e malha fechada, foi possível realizar a análise da eficiência energética do sistema.



Figura 2 - Bancada Experimental

Fonte: do Autor

A bancada foi projetada para emular o sistema de abastecimento de água para duas regiões distintas: a zona baixa e a zona alta. Na zona baixa, a água é impulsionada pela bomba e percorre um trajeto que inclui os componentes PT-2, CV-1, PT-3, FT-1 e CV-2, culminando na caixa d'água. Já na zona alta, o fluxo se origina na bomba e passa pelo booster ou pelo bypass do booster. Para o propósito deste estudo, os estudos foram realizados na zona baixa, o que implicou no fechamento da válvula que conecta a zona alta.

Com base no sistema a ser implementado, sensores distribuídos ao longo da planta coletam dados para entender a relação entre as variáveis de controle e a variável a ser controlada. Esses dados são então utilizados para criar um modelo digital da planta, utilizando um algoritmo de aprendizado de máquina. Esse modelo virtual permite simular o comportamento da planta real.

Após essa etapa, um controlador Fuzzy é projetado, com a definição das funções de pertinência e das regras de controle. Em seguida, utilizando o modelo digital, a sintonia do controlador é avaliada. Por fim, os parâmetros ajustados do controlador são aplicados na planta real, garantindo a manutenção da pressão constante, mesmo com as variações no consumo de água. Esse processo de sintonia é crucial para assegurar uma operação eficiente e confiável do sistema de abastecimento de água.

2.1 PROJETO DO CONTROLADOR

A partir do modelo da planta desenvolvido como modelo caixa-preta, o qual destaca-se por sua simplicidade, flexibilidade e generalização, é possível desenvolver o controlador utilizando

algoritmos que permitem sintonizá-lo com o modelo. Nesta fase, são selecionadas e implementadas técnicas de controle adequadas, as quais visam garantir o desempenho desejado do sistema automatizado. Essas técnicas incluem métodos de controle clássicos, como controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID), assim como abordagens mais avançadas, como controle adaptativo e controle Fuzzy.

O controlador proposto é baseado em duas entradas: o erro e a derivada do erro (Derro). O erro, neste contexto, refere-se à discrepância entre o valor desejado (ou referência) e o valor atual obtido pelo sistema. Por outro lado, a Derro descreve a taxa de mudança do erro ao longo do tempo, indicando se o sistema está se aproximando ou se afastando da referência e com qual velocidade isso ocorre.

A saída do controlador é o incremento na frequência Δf , que representa o ajuste necessário para corrigir o sistema em direção à referência desejada. Assim, o controlador utiliza informações sobre a magnitude e a direção do erro, bem como sua variação ao longo do tempo, para determinar o ajuste adequado na frequência. Uma representação esquemática desse controlador pode ser observada na Figura 3.

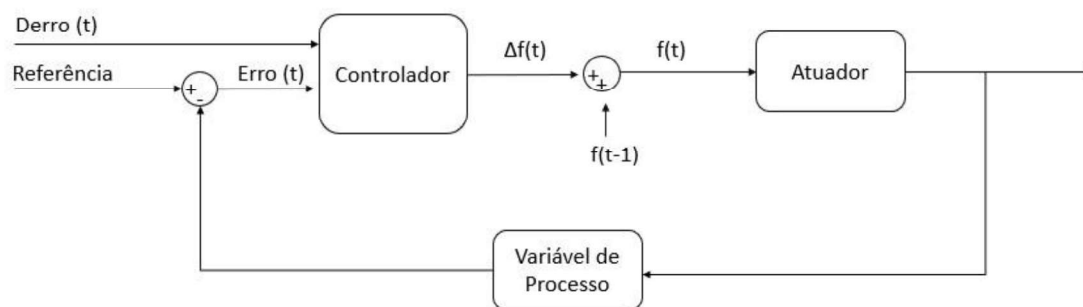


Figura 3 - Controlador Proposto

Fonte: do Autor

O projeto de um controle Fuzzy requer um entendimento detalhado das características da planta, pois as informações obtidas a partir dessas características são fundamentais para a definição dos conjuntos Fuzzy. Para tanto, foram realizados diversos testes em malha aberta no modelo, com o objetivo de analisar os efeitos do atuador no sistema em regime permanente. Essa avaliação possibilitou a identificação dos conjuntos Fuzzy, os quais estão apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3, além de serem ilustrados na Figura 4. É importante destacar que os valores de cada conjunto foram ajustados ao longo do processo de implementação na planta.

Nas tabelas subsequentes, observam-se duas funções de pertinência definidas: a função trapezoidal (trapmf) e a função triangular (trimf). A função trapezoidal atribui um valor elevado de pertinência dentro de um intervalo específico e diminui progressivamente fora desse intervalo, enquanto a função triangular confere um alto valor de pertinência ao redor de um valor central, com uma redução linear à medida que a variável se afasta dessa faixa.

Neste estudo, a função trapezoidal foi aplicada aos conjuntos extremos de cada variável. Por exemplo, no conjunto EPG, qualquer valor superior a 10 pertence completamente a este conjunto. Para os demais conjuntos, foi escolhida a função triangular. No caso do conjunto EZ, o valor 0 é central e pertence integralmente ao conjunto de Erro Zero, e à medida que a variável se afasta de 0, ela perde pertinência de forma gradual e linear.

Tabela 1 - Conjunto Erro

Símbolo	Nome	Função	Suporte
ENG	Erro Negativo Grande	trapmf	[-23 -23 -10 -6]
ENM	Erro Negativo Médio	trimf	[-7 -4 -0.2]
EZ	Erro Zero	trimf	[-0.25 0 0.25]
EPM	Erro Positivo Médio	trimf	[0.2 4 7]
EPC	Erro Positivo Grande	trapmf	[6 10 23 23]

Tabela 2 - Conjunto Derro

Símbolo	Nome	Função	Suporte
DENG	Derivada do Erro Negativo Grande	trapmf	[-7 -7 -6 -4]
DENM	Derivada do Erro Negativo Médio	trimf	[-4.5 -2 -0.2]
DEZ	Derivada do Erro Zero	trimf	[-0.5 0 0.5]
DEPM	Derivada do Erro Positivo Médio	trimf	[0.2 2 4.5]
DEPC	Derivada do Erro Positivo Grande	trapmf	[4 6 7 7]

Tabela 3 - Conjunto Δf

Símbolo	Nome	Função	Suporte
DG	Decremento Grande	trapmf	[-10 -10 -8 -5]
DM	Decremento Médio	trimf	[-6 -4 -1]
Z	Zero	trimf	[-1.3 0 1.3]
IM	Incremento Médio	trimf	[1 4 6]
IG	Incremento Grande	trapmf	[5 8 10 10]

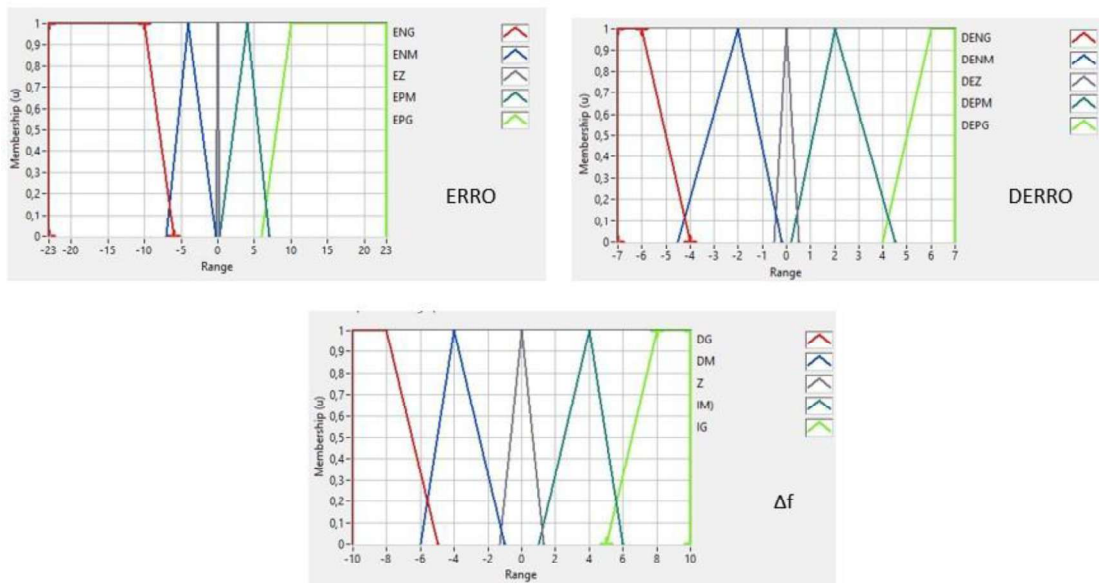


Figura 4 - Variáveis Fuzzy e seus respectivos conjuntos

Fonte: do Autor

Na Tabela 4, as regras para este controle são representadas, mostrando as diferentes combinações de variáveis de entrada e suas consequências na variável de saída do sistema Fuzzy.

Tabela 4 - Regras

REGRAS

	ENG	ENM	EZ	EPM	EPC
DENG	DG	DM	Z	IG	IG
DENM	DG	DM	Z	IG	IG
DZ	DG	DM	Z	IM	IG
DEPM	DG	DM	Z	IM	IG
DEPG	DG	DM	Z	IM	IG

2.2 MÉTRICAS DE VALIDAÇÃO

A análise do desempenho de controladores é essencial para garantir o funcionamento eficaz de sistemas de controle. Uma maneira de avaliar esse desempenho é por meio de métricas, que fornecem medidas quantitativas do quão bem o controlador está atingindo seus objetivos. Neste documento, são apresentados três métricas comuns para analisar controladores em sistemas de controle: o Índice IAE (Integral do Erro Absoluto), o Índice ITAE (Integral do Erro Absoluto Ponderado pelo Tempo) e o MAPE (Mean Absolute Percentage Error - Erro Percentual Absoluto Médio).

O Índice IAE é uma métrica comum para avaliar o desempenho de controladores em sistemas de controle. Ele é calculado como a integral do valor absoluto do erro ao longo do tempo, o que significa que todos os erros, tanto positivos quanto negativos, são somados. Isso proporciona

uma medida direta do erro total acumulado ao longo de todo o período de tempo de interesse [13]. A fórmula para o Índice IAE é:

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt$$

O Índice ITAE é uma variação do Índice IAE que pondera cada valor absoluto do erro pelo tempo correspondente. Isso significa que os erros ocorridos em momentos posteriores têm um impacto maior no valor final do índice em comparação com os erros ocorridos em momentos iniciais. Essa ponderação pode ser útil em situações onde é desejável dar mais ênfase à correção rápida de erros posteriores [13]. A fórmula para o Índice ITAE é:

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)| dt$$

O MAPE é uma métrica que calcula a média dos erros percentuais entre as previsões e os valores reais. Ele fornece uma medida da precisão do modelo em termos percentuais, o que é útil para entender o tamanho do erro em relação ao valor absoluto dos dados. O MAPE é comumente usado em previsões e modelagem para avaliar o desempenho do modelo em termos de precisão [14]. A fórmula para o MAPE é:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_p[i] - y_m[i]|}{|y_p[i]|}$$

2.3 CENÁRIOS DE APLICAÇÃO

A análise dos efeitos do controlador Fuzzy na planta foi realizada em três cenários distintos, no qual observou-se a avaliação da capacidade do controlador em manter a pressão do sistema dentro dos limites desejados diante de variações no valor de referência da pressão e no ângulo da válvula. Em outro cenário, comparou-se duas abordagens de controle Fuzzy, inferência Mamdani e Sugeno, com o objetivo de determinar as vantagens de cada método em termos de desempenho e precisão. E por fim, como enfoque principal deste trabalho, analisou-se o impacto do controle Fuzzy na eficiência energética do sistema, avaliando como o controlador influencia os custos energéticos ao comparar o consumo de energia com e sem a aplicação do controle.

3. RESULTADOS

Neste experimento, dois testes foram realizados para analisar o impacto do controle na eficiência energética. No primeiro, o sistema operou em malha aberta, Figura 5 com frequência fixa de 45 Hz, enquanto o ângulo da válvula CV-1 foi ajustado para 0°, 30°, 50° e 70°, simulando diferentes padrões de consumo. No segundo teste, a malha de controle foi fechada com um set point de 7,8 mca, equivalente à pressão obtida a 45 Hz em malha aberta, mantendo as mesmas variações no ângulo da válvula.

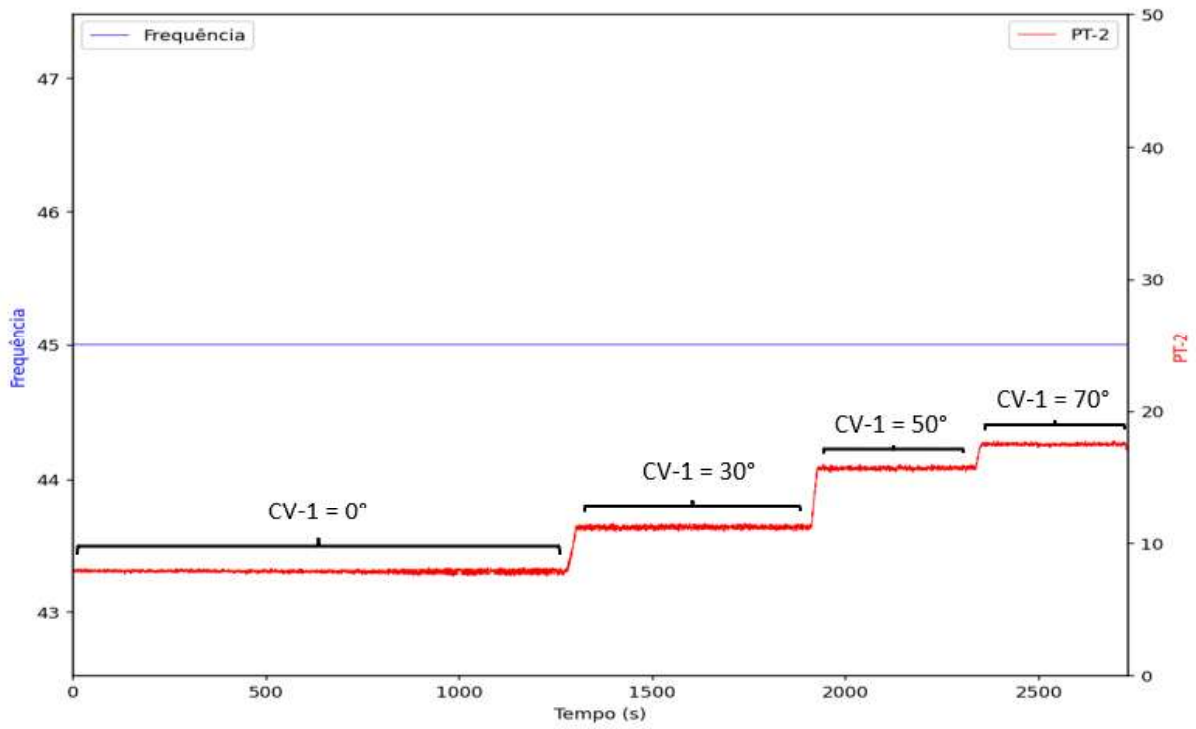


Figura 5 -Sistema em Malha Aberta

Fonte: do Autor

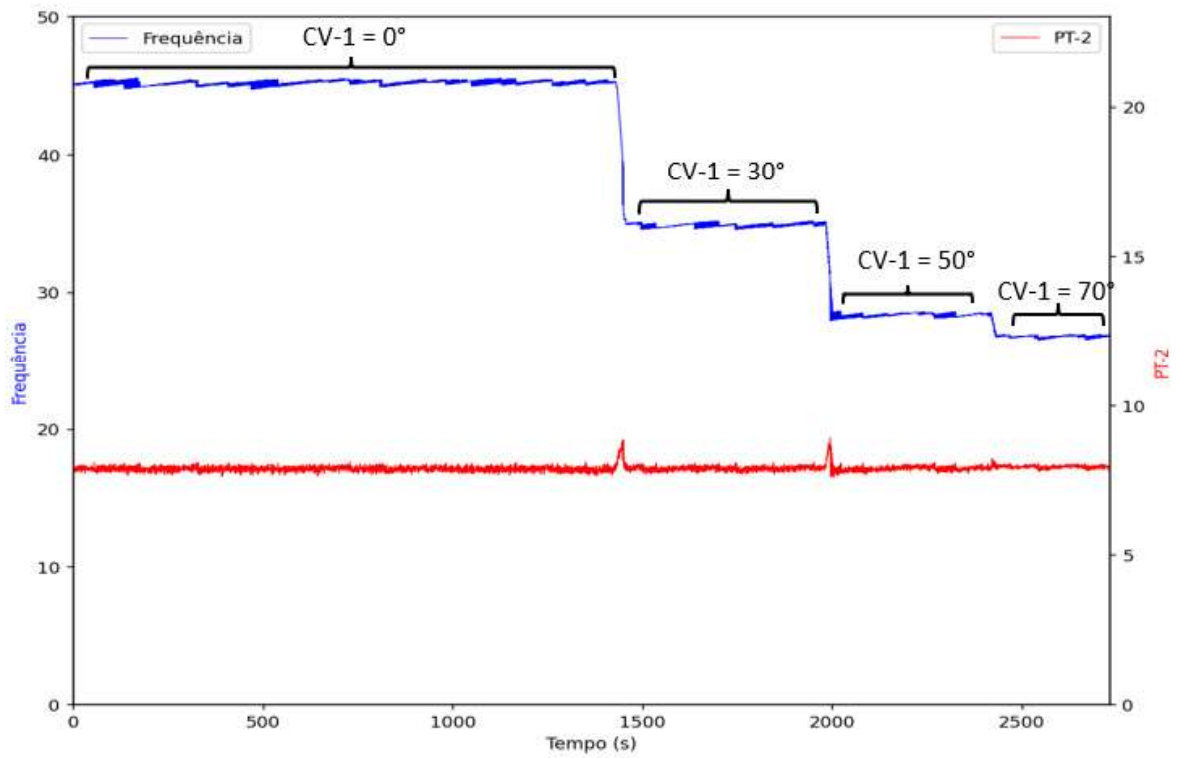


Figura 6 -Sistema em Malha Fechada

Fonte: do Autor

Na Figura 5, que ilustra o comportamento do sistema em malha aberta, é possível observar que à medida que o grau de fechamento de CV-1 aumenta, a pressão também aumenta. Isso ocorre devido à falta de variação na frequência, o que representa um consumo de energia elétrica desnecessário. Por outro lado, na Figura 6, nota-se que, com o aumento do ângulo de CV-1, a frequência diminui, reduzindo o consumo energético e evitando o aumento das perdas mecânicas.

Tabela 5- Consumo do Sistema em Malha Aberta

Tempo (min)	CV-1 (°)	Corrente (A)	Potência (W)	Energia (kWh)
10	0	3,65	1652	0,2754
10	30	3,45	1562	0,2603
10	50	3,28	1485	0,2475
10	70	3,14	1421	0,2369

Tabela 6 - Consumo do Sistema em Malha Fechada

Tempo (min)	CV-1 (°)	Corrente (A)	Potência (W)	Energia (kWh)
10	0	3,65	1652	0,2754
10	30	2,96	1340	0,2333
10	50	2,72	1231	0,2052
10	70	2,66	1204	0,2007

A corrente, potência e energia consumidas em cada ensaio estão detalhadas nas Tabelas 5 e 6. A análise desses dados revela que o sistema em malha fechada obteve uma redução significativa no consumo de energia: 14,20% para CV-1 em 30°, 17,07% para 50° e 15,28% para 70°, em comparação com o motor operando a 45 Hz. Em média, isso representa uma diminuição de 15,51%.

É importante ressaltar que, conforme detalhado nas Tabelas 5 e 6, o intervalo para cada ensaio é de 10 minutos. Contudo, durante a análise dos dados, observou-se que o período de amostragem aumenta gradualmente ao longo do tempo, resultando em uma redução na quantidade de amostras.

Como proposta de validação do controlador proposto, observa-se, como ilustrado na Figura 7, a resposta ao degrau do sistema controlado, onde o tempo de subida do sistema é de aproximadamente 2,574 segundos, enquanto o tempo de assentamento é de cerca de 27 segundos. O sobressinal é de 1,62%, indicando que a resposta do sistema apresenta uma pequena oscilação acima do valor de regime permanente antes de atingir o estado estacionário. Além disso, o erro em regime permanente é de 0,50%, o que sugere que o sistema consegue alcançar um valor próximo ao valor desejado após um certo tempo.

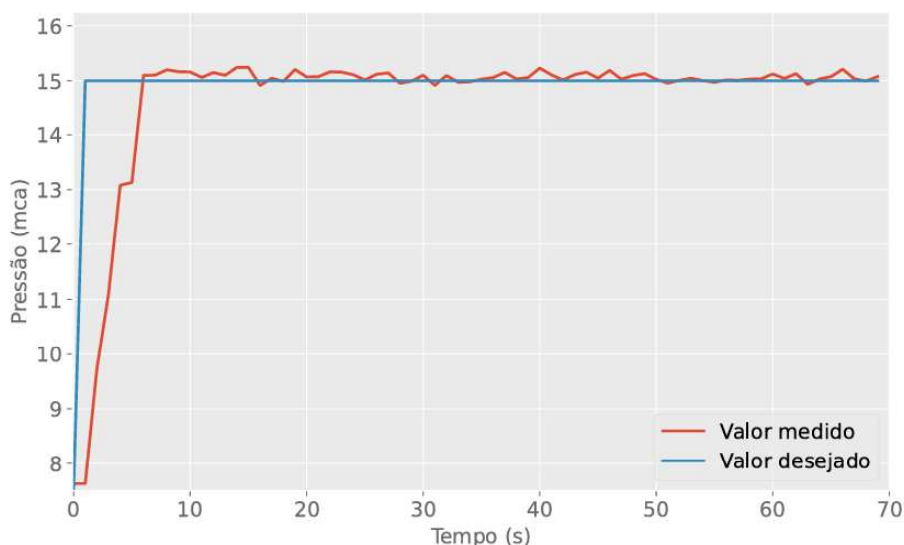


Figura 7: Resposta ao degrau do controlador Fuzzy atuando no modelo da planta.

Fonte: do Autor

Ao analisar os valores das métricas da planta real, observa-se que, embora o erro médio percentual absoluto permaneça relativamente estável, outras métricas indicam a necessidade de ajustes no controlador Fuzzy. A Integral do Erro Quadrático, por exemplo, mostra que o controlador apresenta uma resposta que pode ser mais eficiente em determinadas condições, mas também há uma acumulação de erro ao longo do tempo, evidenciada pelo aumento no Tempo Integral do Erro Absoluto. Essas observações destacam a importância de considerar as características específicas da planta real durante o projeto e o ajuste do controlador Fuzzy, a fim de otimizar o desempenho do sistema em condições reais de operação. Tais questões podem ser verificadas na Tabela 6.

Tabela 6- Métricas de avaliação da resposta ao degrau do controlador Fuzzy atuando na planta real.

Métrica	Valor
Integral do Erro Quadrático	45,13
Tempo Integral do Erro Absoluto	41,56
Erro Absoluto Integral	11,15
Erro médio percentual absoluto	2,49 %

4. CONCLUSÕES

A pesquisa demonstrou que a implementação do controlador Fuzzy no sistema de bombeamento de água resultou em uma otimização significativa da eficiência energética, com uma redução média de 15,51% no consumo de energia em comparação com o sistema operando a 45 Hz em malha aberta. A rápida interação na sintonia do controlador, com ajustes imediatos nos parâmetros e análise do impacto no sistema, permitiu uma otimização precisa e eficiente.

A abordagem proposta mostrou-se flexível e adaptável, podendo ser aplicada a outros sistemas e tipos de controle.

Para trabalhos futuros, sugere-se a exploração de outras metodologias de controle, como controladores PID avançados ou técnicas de controle adaptativo, a fim de comparar seu desempenho com o controlador Fuzzy adotado neste estudo. A automação completa do processo também é uma área promissora para pesquisas subsequentes, permitindo uma implementação mais ágil e eficiente da metodologia proposta. Em suma, a implementação do controle de pressão foi bem-sucedida e atendeu aos objetivos estabelecidos, mas existem diversas oportunidades para aprimorar ainda mais a abordagem e expandir suas aplicações em diferentes contextos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Mestrado e Doutorado Acadêmico para Inovação (MAI/DAI) do CNPq pelo suporte financeiro e incentivo à pesquisa, bem como ao Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) pelo apoio técnico e infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- [1] PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm. Acesso em: 06 maio 2024.
- [2] INSTITUTO TRATA BRASIL. Estudo de Perdas de Água 2024 (SNIS, 2022). Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2024/06/Estudo-da-GO-Associados-Perdas-de-Agua-de-2024-V2.pdf>. Acesso em: 08 de julho de 2025
- [3] SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf. Acesso em: 9 de julho de 2025.
- [4] MAMADE, A.; CATARINA, S.; ANA MARQUES, A. LOUREIROA, D. HELENA ALEGREA, H. COVASC, D. Energy auditing as a tool for outlining major inefficiencies: results from a real water supply system. 13th Computer Control for Water Industry Conference, Procedia Engineering, vol. 119, 2015, p. 1098-1108.
- [5] CHERCHI, C., BADRUZZAMAN, M., GORDON, M., BUNN, S., JACANGELO, J.G. Investigation of cost and energy optimization of drinking water distribution systems. Environ. Sci. Technol. Vol.49, n. 22, 2015, p. 13724-13732.

- [6] SANTOS DE ARAÚJO, José Vinicius; VILLANUEVA, Juan Moises Mauricio; CORDULA, Marcio Miranda; CARDOSO, Altamar Alencar; GOMES, Heber Pimentel. Fuzzy control of pressure in a water supply network based on neural network system modeling and IoT measurements. *Sensors*, v. 22, n. 23, art. 9130, 2022. DOI: 10.3390/s22239130. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9130>. Acesso em: 1 jul. 2025.
- [7] MOREIRA, Hugo A. M.; MENDONÇA, Kamilla H.; GOMES, Heber P.; VILLANUEVA, Juan M.; SILVA, Anderson V. S. Controle autorregressivo para estabilização da pressão em sistemas de bombeamento com demanda variável. In: Congresso Brasileiro de Automática – CBA, n. 1, 2020.
- [8] BARROS FILHO, Emânuel Guerra de; *et al.* Sistema inteligente para o controle de pressão de redes de distribuição de água abastecidas por bombas associadas em paralelo. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2016.
- [9] FLORES, Thommas Kevin Sales; VILLANUEVA, Juan Moises Mauricio; GOMES, Heber Pimentel; CATUNDA, Sebastian Yuri Cavalcanti. Adaptive pressure control system based on the maximum correntropy criterion. *Sensors*, v. 21, n. 15, 2021, p. 5156.
- [10] SALVINO, Laís Régis *et al.* Eficiência energética em sistemas pressurizados de distribuição de água com o uso de redes neurais artificiais. 2018.
- [11] OLIVEIRA, José Kleber Costa de *et al.* Lógica fuzzy aplicada na otimização operacional de rede setorizada de distribuição de água. 2017.
- [12] CAVALCANTI, D. B.; MOURA, J. J. P.; VILLANUEVA, J. M. M.; GOMES, H. P. Modelagem de um sistema de bombeamento para o controle de vazão por conversor de frequência baseado na teoria de identificação de sistemas. *Anais do Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, 2019. v. 1.
- [13] CHAIB, Lakhdar; CHOUCHA, Abdelghani; ARIF, Salem. Optimal design and tuning of novel fractional order PID power system stabilizer using a new metaheuristic Bat algorithm. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 8, n. 2, p. 113-125, 2017.
- [14] JACKSON, Elise K. *et al.* Introductory overview: Error metrics for hydrologic modelling—A review of common practices and an open source library to facilitate use and adoption. *Environmental Modelling & Software*, v. 119, p. 32-48, 2019.