

Controle de Sistemas de Abastecimento de Água e Análise de Eficiência Energética utilizando Inteligência Artificial

Jose H. B. Silva* Laís A. Mangueira** Eduardo W. Nobrega***
Heber P. Gomes**** Victor L. Santos† Juan M. M. Villanueva‡
Thommas K. S. Flores § Nady Rocha| Mateus N. R. Lima ††

* *Universidade Federal da Paraíba, PB, (e-mail:
jose.dasilva@estudante.cear.ufpb.br)*

** *Universidade Federal da Paraíba, PB, (e-mail:
lais.mangueira@estudante.cear.ufpb.br)*

*** *Universidade Federal da Paraíba, PB, (e-mail:
edu.nobrega@estudante.cear.ufpb.br)*

**** *Universidade Federal da Paraíba, PB, (e-mail: heberp@uol.com.br)*

† *Companhia de Água e Esgotos da Paraíba, PB, (e-mail:
victor.santos@cagepa.pb.gov.br)*

‡ *Universidade Federal da Paraíba, PB, (e-mail:
jmauricio@cear.ufpb.br)*

§ *Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, (e-mail:
thommas.flores.101@ufrn.edu.br)*

| *Universidade Federal da Paraíba, PB, (e-mail:
nadyrocha@cear.ufpb.br)*

†† *Universidade Federal da Paraíba, PB, (e-mail:
mateus.lima@estudante.cear.ufpb.br)*

Abstract: This study presents an innovative approach to optimizing the operation of a water supply plant, combining virtual model and advanced control, specifically a fuzzy controller, to precisely adjust the hydraulic pressure control loop by manipulating the rotation speed of a centrifugal pump. The proposed methodology was evaluated quantitatively, revealing promising results: the plant model showed a mean absolute percentage error (MAPE) of 0.76%, while the fuzzy controller, both in the virtual model and in the real plant, achieved acceptable rise and settling times, with low values of overshoot and error in steady state. In addition, the implementation of the controller resulted in an average reduction of 15.51% in energy consumption compared to operation without pressure control. The integration of the virtual model allowed for real-time simulations and rapid iteration in the tuning of the controller, demonstrating its potential for efficient and accurate optimization of the water supply system.

Resumo:

Este estudo apresenta uma abordagem inovadora para otimizar a operação de uma planta de abastecimento de água, combinando construção de modelo virtual e controle avançado, especificamente um controlador Fuzzy, para ajustar precisamente a malha de controle de pressão hidráulica por meio da manipulação da velocidade de rotação de uma bomba centrífuga. A metodologia proposta foi avaliada quantitativamente, revelando resultados promissores: o modelo da planta apresentou um erro percentual médio absoluto (MAPE) de 0,76%, enquanto o controlador Fuzzy, tanto no modelo virtual quanto na planta real, alcançou tempos de subida e assentamento aceitáveis, com baixos valores de sobressinal e erro em regime permanente. Além disso, a implementação do controlador resultou em uma redução média de 15,51% no consumo de energia em comparação com a operação sem controle de pressão. A integração do modelo virtual permitiu simulações em tempo real e uma rápida iteração na sintonia do controlador, demonstrando seu potencial para otimização eficiente e precisa do sistema de abastecimento de água.

Keywords: Fuzzy Control; Water Supply System; Energy Efficiency; Virtual Model.

Palavras-chaves: Controle Fuzzy; Sistemas de Abastecimento de Água; Modelo Virtual; Eficiência Energética.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é, inegavelmente, um país rico em recursos hídricos. No entanto, de acordo com Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (2025), uma parte significativa da população brasileira vivencia uma segurança hídrica de média a baixa. Isso destaca a necessidade de priorizar o sistema de abastecimento de água do país. 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% (Presidência da República, 2020).

Um relatório recente do Instituto Trata Brasil (ITB), publicado em 2022, revela uma realidade preocupante: mais de 37% da água captada nos reservatórios brasileiros é perdida durante o processo de distribuição antes de chegar ao consumidor final (Brasil, 2022). Diante desse cenário, as perdas no sistema de abastecimento de água (SAA) são classificadas em dois tipos distintos: perdas aparentes, referentes aos volumes de água consumidos, mas não medidos ou contabilizados, e perdas reais, que englobam os volumes de água não consumidos devido a vazamentos e outros problemas no sistema de distribuição.

No que se refere às perdas reais, (Cavalcanti et al., 2019) enfatiza que a eficiência das redes de distribuição de água está intimamente ligada a fatores como vazamentos, degradação da infraestrutura, consumo energético dos conjuntos motor-bomba, bem como o controle preciso da pressão e vazão. Destaca-se ainda que tais parâmetros podem ser eficientemente gerenciados por meio do controle da velocidade dos conjuntos motor-bomba.

Mediante os desafios ao combate às perdas, diversos métodos promissores são desenvolvidos para o controle da pressão, a exemplo da aplicação da lógica Fuzzy (Meng et al., 2021), redes neurais artificiais (Barros Filho et al., 2016), controle adaptativo (Flores et al., 2021) e controle PID (Xuan et al., 2024). A escolha predominante por esses métodos é justificada pela dinâmica variável do sistema de abastecimento e pela presença de ruídos nas medições das variáveis, que frequentemente conduzem a ineficiências e instabilidades no processo.

Ademais, além das técnicas de controle mencionadas, estão sendo exploradas metodologias de virtualização dos sistemas de distribuição de água, como a modelagem baseada em redes neurais (Santos de Araújo et al., 2022) e a identificação de sistemas utilizando o modelo *AutoRegressive Moving Average Model with exogenous Input* (ARMAX), conforme discutido em (Cavalcanti et al., 2019). Vale ressaltar que a modelagem matemática direta torna-se impraticável devido à natureza dinâmica e complexa desses sistemas, onde as equações que os descrevem se modificam para cada ponto de operação (Barros Filho et al., 2016).

Nesse sentido, este estudo propõe uma abordagem fundamentada na utilização de modelo virtual, com base na inteligência artificial, como plataforma para a validação e sintonia de um controlador Fuzzy aplicado a um sistema de abastecimento de água real controlando a pressão hidráulica medida em metros de coluna de água (mca). Adicionalmente, o presente trabalho foi desenvolvido na mesma planta utilizada por (Prudêncio et al., 2024), porém objetiva comparar o desempenho do modelo virtual com o sistema real, bem como avaliar a eficiência energética do sistema de bombeamento por meio de uma proposta metodológica.

Como contribuições deste trabalho, é possível destacar o desenvolvimento de uma metodologia para projeto de controle avançado; a modelagem de uma planta real utilizando inteligência artificial e, por fim, a avaliação da eficiência energética do uso de algoritmo de controle moderno e modelagem inteligente. Dessa maneira, o artigo está organizado em sessões de Introdução, Trabalhos Relacionados, Metodologia, Resultados e Conclusão.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

A pesquisa sobre virtualização, controle e otimização em sistemas de abastecimento de água é crucial para aprimorar a eficiência energética e reduzir as perdas no setor de saneamento. Abordagens inovadoras, como a aplicação de 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 nesse domínio.

Santos de Araújo et al. (2022) propuseram um sistema de controle de pressão para uma rede de distribuição de água, utilizando modelagem baseada em redes neurais artificiais (ANN) e controle fuzzy. 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.

Flores et al. (2021) desenvolveram 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. Apesar de eficaz no rastreamento da pressão desejada, sua complexidade de implementação pode ser uma limitação.

Moreira et al. (2020) propuseram uma técnica de controle inovadora em sistemas de abastecimento de água, utilizando um controlador ARX desenvolvido a partir de um banco de dados construído com um controlador primário Fuzzy. 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.

Barros Filho et al. (2016) desenvolveram um sistema de controle inteligente para sistemas de bombeamento em abastecimento de água, utilizando redes neurais artificiais, especificamente a Rede Perceptron Multicamadas (PMC). Embora tenha demonstrado desempenho satisfatório, a falta de uma regra clara para determinar o número ideal de neurônios na camada oculta pode ser uma limitação.

Diante do exposto, identifica-se uma oportunidade para o desenvolvimento de uma metodologia baseada em modelos virtuais, inteligência artificial para simulação e ajuste de um controle avançado baseado em lógica Fuzzy aplicado a um sistema de distribuição de água.

3. METODOLOGIA

Este estudo apresenta uma abordagem inovadora para aprimorar a operação de uma planta de abastecimento de água, combinando o uso de modelos virtuais e controle avançado, especificamente um controlador baseado em lógica Fuzzy. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia para realização do controle, implementada de forma experimental na bancada ilustrada na Figura 1.



Figura 1. Bancada experimental

O objetivo é sintonizar de forma precisa a malha de controle de pressão hidráulica, manipulando a velocidade de rotação de uma bomba centrífuga. Cada etapa da metodologia proposta está exposta detalhadamente na Figura 2.

Inicialmente, os dados dos sensores distribuídos ao longo da planta são coletados e analisados para compreender a relação entre as variáveis de controle e a variável que será controlada, formando assim o Bloco A da arquitetura proposta. Em seguida, esses dados são utilizados para criar um modelo virtual da planta mediante um algoritmo de aprendizado de máquina no Bloco B. Esse modelo virtual permite simular o comportamento da planta real.

No Bloco C, um controlador Fuzzy é projetado, isto é, são definidas as funções de pertinência e regras. Após isso, utilizando o modelo virtual, a sintonia do controlador é

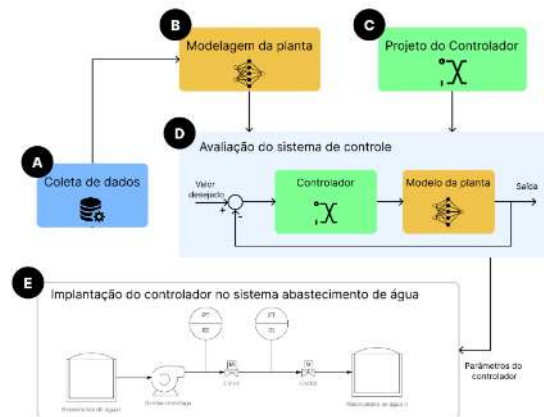


Figura 2. Metodologia proposta para sintonia e validação do controlador Fuzzy utilizando modelos virtuais.

avaliada, formando o Bloco D. Por fim, os parâmetros do controlador são aplicados na planta real para manter a pressão constante, adaptando-se às variações no consumo de água, Bloco E. Este processo de sintonia é fundamental para garantir uma operação eficiente e confiável da planta de abastecimento de água. Com isso, cada bloco é explicado detalhadamente:

3.1 Bloco A - Coleta de Dados.

A coleta de dados foi realizada em uma bancada experimental, considerando cinco pontos de medição: um transdutor de pressão (PT-2), duas válvulas reguladoras de pressão automáticas (CV-1 e CV-2), um transdutor de vazão (FT-1) e a velocidade de rotação do conjunto motor-bomba (FRQ). Os ensaios foram conduzidos variando a frequência entre 30 e 55 Hz, em intervalos de 5 Hz, cobrindo a faixa operacional de uma bomba centrífuga. Além disso, o ângulo da válvula CV-1 foi ajustado em quatro posições (0°, 30°, 50° e 70°), escolhidos de forma arbitrária visando representar diferentes níveis de consumo. Cada medição teve duração de dois minutos, com uma taxa de amostragem de 150 ms.

Após a coleta, os dados passaram por um processo de pré-processamento, validação e divisão em conjuntos de treinamento e teste. A distribuição seguiu a proporção de 70% para treinamento e 30% para teste, sendo que, dentro do conjunto de treinamento, 20% foram utilizados para validação e 80% para ajuste do modelo. Essa divisão garantiu a manutenção das proporções das classes nos subconjuntos, assegurando um treinamento balanceado e eficaz do modelo.

3.2 Bloco B - Modelagem da Planta

Este trabalho propõe o uso de uma Rede Neural Artificial do tipo Multilayer Perceptron (MLP) para modelar a pressão de saída medida pelo transdutor PT-2. A arquitetura definida possui três entradas: velocidade de rotação do motobomba, ângulo da válvula CV-1 e a pressão de saída atrasada.

Após diferentes testes experimentais, foram escolhidas duas camadas ocultas com cinco neurônios cada, como ilustrado na Figura 3. A função de ativação adotada nas camadas ocultas foi a *Hyperbolic Tangent Sigmoid*,

enquanto a camada de saída utilizou uma função linear. O treinamento da rede foi realizado por meio do algoritmo Levenberg-Marquardt (LM).

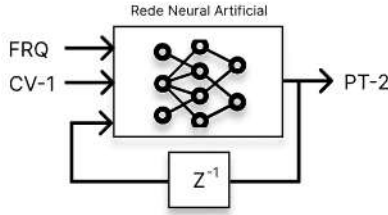


Figura 3. Topologia da RNA utilizada para modelar a planta (modelo virtual).

3.3 Bloco C - Projeto do Controlador

Para controlar a pressão do sistema em estudo é proposto a estrutura do controle baseado em lógica Fuzzy, ilustrada na Figura 4. O controle é do tipo incremental MISO (Multiple Input Single Output), em que P é a variável de controle (pressão do transdutor PT-2), P^* é o valor de referência da pressão, e representa o erro atual ($e = P^* - P$), Δe é a variação do erro ($\Delta e = e(k) - e(k-1)$), Δf é o incremento no sinal de atuação (velocidade de rotação do conjunto motobomba) e $f(k-1)$ é o sinal de atuação anterior. Essa abordagem incremental permite um controle mais suave e estável, pois os ajustes no sinal de controle ocorrem gradualmente. Além disso, o incremento Δf é limitado no intervalo de 10 a 10, o que evita variações abruptas na resposta do sistema. A frequência elétrica resultante, representada por $f(k)$, é restringida a um valor máximo de 60 Hz por meio de um bloco de saturação, uma vez que o motor foi projetado para operar com frequência nominal de 60 Hz.

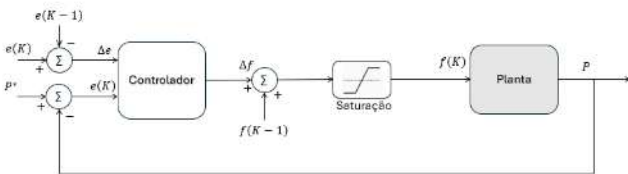


Figura 4. Diagrama de blocos do controlador Fuzzy proposto.

O projeto de um controle Fuzzy exige um entendimento detalhado da planta para definir as funções de pertinência e regras. Para isso, testes em malha aberta foram realizados, analisando os efeitos do atuador no sistema. Com base nesses resultados, foram determinados os conjuntos Fuzzy, detalhados nas Tabelas 1, 2 e 3, utilizando as funções de pertinência trapezoidal (trapmf) e triangular (trimf).

A função de pertinência trapezoidal foi utilizada nos conjuntos extremos de cada variável, garantindo pertencimento total a partir de um limite, como no conjunto EPG, onde valores acima de 10 são integralmente incluídos. Já para os demais conjuntos, aplicou-se a função triangular. No caso do conjunto EZ, o valor 0 pertence totalmente ao Erro Zero e, à medida que varia, sua pertinência diminui linearmente. O sistema de inferência fuzzy adotado segue o modelo de Mamdani, no qual tanto as premissas quanto

as conclusões das regras são representadas por conjuntos fuzzy. Para a etapa de defuzzificação, utilizou-se o método do centróide, também conhecido como centro de gravidade, que calcula a saída como o centro da área sob a curva resultante da agregação das regras.

Tabela 1. Funções de pertinência do erro.

Abreviatura	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]
EPG	Erro positivo grande	trapmf	[6 10 23 23]

Tabela 2. Funções de pertinência da variação do erro.

Abreviatura	Nome	Função	Suporte
DENG	Derro negativo grande	trapmf	[-7 -7 -6 -4]
DENM	Derro negativo médio	trimf	[-4.5 -2 -0.2]
DEZ	Derro zero	trimf	[-0.5 0 0.5]
DEPM	Derro positivo médio	trimf	[0.2 2 4.5]
DEPG	Derro positivo grande	trapmf	[4 6 7 7]

Tabela 3. Funções do incremento de rotação.

Abreviatura	Nome	Função	Suporte
DG	Decremento grande	trapmf	[-10 -10 -8 -5]
DM	Decremento médio	trimf	[-6 -4 -1]
IZ	zero	trimf	[-1.3 0 1.3]
IM	Incremento médio	trimf	[1 4 6]
IG	Incremento grande	trapmf	[5 8 10 10]

As regras foram elaboradas para garantir uma resposta de primeira ordem com erro próximo de zero, evitando sobressinais excessivos que poderiam causar rompimento de ductos, cavitação e sobrecorrente no motor. A Tabela 4 apresenta as 25 regras definidas pelo especialista, visando estabilizar o sistema e assegurar transições suaves entre as regras de entrada e saída.

Tabela 4. Regras do Controlador.

	ENG	ENM	EZ	EPM	EPG
DENG	DG	DM	IZ	IG	IG
DENM	DG	DM	IZ	IG	IG
DEZ	DG	DM	IZ	IM	IG
DPM	DG	DM	IZ	IM	IG
DEPG	DG	DM	IZ	IM	IG

3.4 Bloco D - Avaliação do sistema de controle

Para quantificar o desempenho do erro entre o valor desejado e a saída da planta, foram utilizados três indicadores de desempenho baseados no erro integral e um baseado no erro médio absoluto, conforme listado abaixo:

ISE - Erro Quadrático Integral: Atribui maior peso a erros grandes e menor peso a erros pequenos, resultando em baixa seletividade. Sistemas projetados com esse critério tendem a ter resposta rápida, porém com menor estabilidade relativa e maior propensão a oscilações:

$$ISE = \int_0^T \varepsilon(t)^2 dt \quad (1)$$

ITAE - Erro Absoluto Integrado no Tempo: O erro é ponderado pelo tempo, então os erros iniciais recebem uma

pequena ponderação e os erros finais, mesmo que pequenos, recebem um valor maior durante a ponderação:

$$ITAE = \int_0^T t|\varepsilon(t)|dt \quad (2)$$

IAE - Erro Absoluto Integral: Pondera todos os erros. O uso deste indicador no projeto provoca no sistema uma característica amortecida, uma transição suave e um *overshoot* não elevado:

$$IAE = \int_0^T |\varepsilon(t)|dt \quad (3)$$

MAPE - Erro Percentual Médio Absoluto: Este indicador é uma medida de precisão, em que o tamanho do erro é dado em termos percentuais:

$$MAPE = \sum_{n=1}^N \left| \frac{y_p[n] - y_m[n]}{y_p[n]} \right| \quad (4)$$

3.5 Bloco E - Implementação

As etapas anteriores abordaram a modelagem da planta e o projeto do controle Fuzzy. Por fim, o controlador foi implementado no sistema físico via LabVIEW. Para implementação desse projeto foram desenvolvidos diferentes cenários de aplicação:

Cenário I: Teste de Efetividade A avaliação do desempenho do controlador Fuzzy foi realizada por meio de simulações que variaram o *set point* e o ângulo da válvula. Para um *set point* de 7,5 mca, os ângulos foram ajustados para 0°, 30°, 50° e 70°; para 15 mca, foram utilizados 70°, 50° e 30°; e para 10 mca, 30°, 50° e 70°. A válvula é normalmente aberta, logo, 0° está totalmente aberta e 90° totalmente fechada. A válvula é normalmente aberta, ou seja, encontra-se totalmente aberta em 0° e totalmente fechada em 90°. Os ângulos adotados neste experimento foram selecionados de forma a abranger uma faixa representativa de operação, com espaçamento suficiente entre eles para captar variações significativas na pressão. Objetivase, também, representar diferentes padrões de consumo, simulando variações típicas de demanda no sistema.

A Figura 5 ilustra essas variações, dividindo o gráfico em regiões numeradas de 1 a 10, correspondentes a cada mudança de ângulo. Essa segmentação permitiu analisar o MAPE de cada região, além dos tempos de transição e assentamento, que representam, respectivamente, o tempo necessário para a válvula atingir a nova posição e para o sistema se estabilizar após a mudança.

Cenário II: Eficiência Energética Neste experimento, dois testes foram realizados para analisar o impacto do controle Fuzzy na eficiência energética. No primeiro, o sistema operou em malha aberta, Figura 6 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, Figura 7, 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.

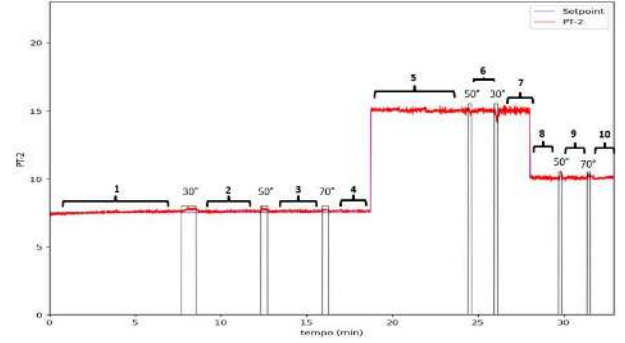


Figura 5. Cenário I

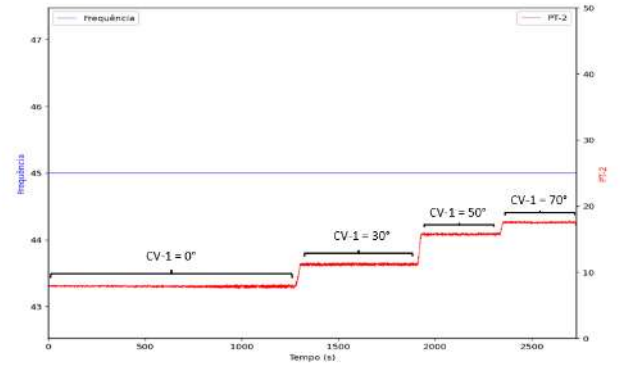


Figura 6. Cenário II- Malha aberta

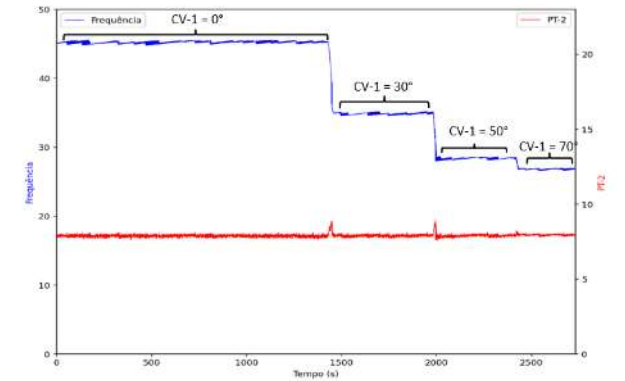


Figura 7. Cenário II- Malha fechada

4. RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos durante os experimentos, em primeiro lugar será apresentado o resultado da modelagem da planta em ambiente virtual, em seguida o sistema de controle operando na planta virtualizada e, por fim, a atuação do controle operando no sistema real.

4.1 Avaliação da modelagem da planta

O resultado para validação do modelo estão visualmente representados no histograma da Figura 8, no qual a pressão real é delineada em vermelho, enquanto a pressão prevista é destacada em azul. A fim de quantificar a precisão do modelo, utilizou-se a métrica MAPE, escolhida por sua interpretação intuitiva e expressão em termos percentuais. Nota-se que o MAPE alcançado para este modelo foi de

0,76%, sugerindo um desempenho considerado bastante satisfatório, dada a faixa de valores de erro máximo (0,58), mínimo (-0,26), média (0,0) e desvio padrão (Std) (0,1) observados no conjunto de dados de validação.

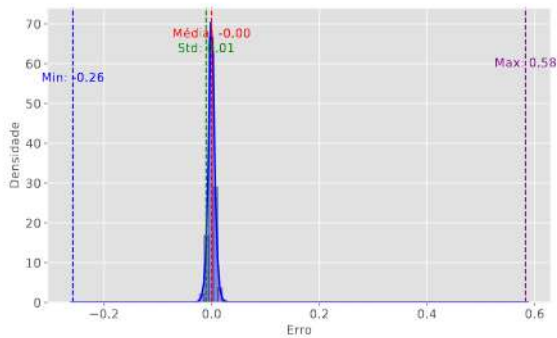


Figura 8. Histograma

4.2 Avaliação do controlador Fuzzy atuando no modelo da planta

A Figura 9 e a Tabela 5 mostram a resposta ao degrau do sistema controlado, onde pode-se observar que o tempo de subida do sistema é de aproximadamente 2 segundos, enquanto o tempo de assentamento é de cerca de 4 segundos. O sobressinal é de 0%, indicando que a resposta do sistema não ultrapassa o valor de regime permanente antes de atingir o estado estacionário. Além disso, o erro em regime permanente é de 1,33%, o que sugere que o sistema consegue alcançar um valor próximo ao valor desejado após um certo tempo.

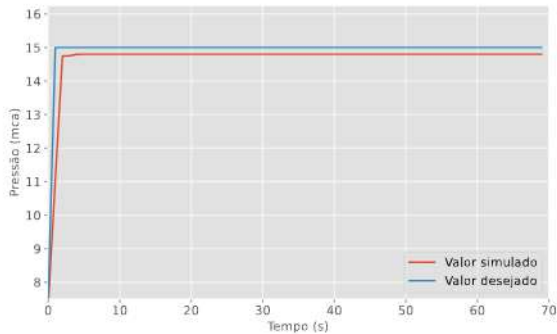


Figura 9. Resposta ao degrau do controlador Fuzzy atuando no modelo da planta.

Tabela 5. Características da resposta ao degrau do controlador Fuzzy atuando no modelo da planta.

Característica	Resposta do sistema
Tempo de subida	2 s
Tempo de assentamento	4 s
Sobressinal	0 %
Erro em regime permanente	1,33 %

A Tabela 6 apresenta métricas de avaliação adicionais que complementam a análise da resposta ao degrau do sistema controlado pelo controlador Fuzzy. O ISE, ITAE e IAE indicam o quão bem o sistema é capaz de minimizar o erro ao longo do tempo, com o ITAE enfatizando os erros iniciais e o IAE considerando o erro total. Valores

menores dessas métricas sugerem um melhor desempenho do sistema em termos de precisão e rapidez na resposta. Por outro lado, o MAPE fornece uma medida da precisão do modelo em relação aos dados observados

Tabela 6. Métricas de avaliação da resposta ao degrau do controlador Fuzzy atuando no modelo da planta.

Métrica	Valor
Integral do Erro Quadrático	18,32
Tempo Integral do Erro Absoluto	487
Erro Absoluto Integral	17,83
Erro médio percentual absoluto	2,49 %

4.3 Avaliação do controle Fuzzy atuando na planta real

A Figura 10 e a Tabela 7 mostram a resposta ao degrau do sistema controlado, onde pode-se observar que 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.

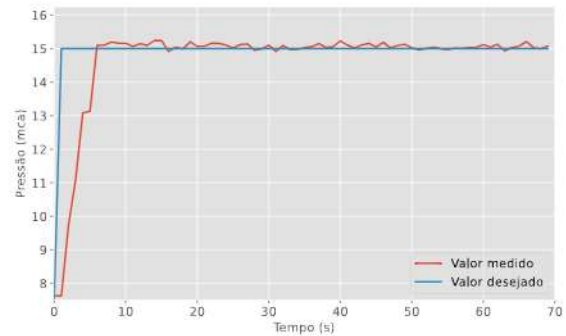


Figura 10. Resposta ao degrau do controlador Fuzzy atuando no modelo da planta.

Tabela 7. Características da resposta ao degrau do controlador Fuzzy atuando na planta real.

Característica	Resposta do sistema
Tempo de subida	2,574 s
Tempo de assentamento	27,027 s
Sobressinal	1,62 %
Erro em regime permanente	0,50 %

Ao comparar os valores das métricas apresentadas nas Tabelas 8 e 6, observam-se diferenças significativas na resposta do controle Fuzzy. Enquanto o erro médio percentual absoluto permanece relativamente estável em ambas as situações, outras métricas revelam disparidades marcantes. É notável que a Integral do Erro Quadrático seja substancialmente menor no modelo da planta em comparação com a planta real, sugerindo uma maior eficácia do controlador no ambiente simulado. Além disso, o Tempo Integral do Erro Absoluto é significativamente maior no modelo da planta, indicando uma acumulação mais pronunciada de erro ao longo do tempo nessa configuração. Essas discrepâncias destacam a importância de considerar as diferenças entre o modelo e a planta real durante o projeto

e ajuste do controlador Fuzzy, a fim de assegurar um desempenho satisfatório em condições reais de operação.

Tabela 8. 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 %

4.4 Avaliação da eficiência energética

Finalmente, na presente pesquisa, investiga-se o impacto da metodologia proposta na eficiência energética de um sistema de bombeamento de água experimental. Inicialmente, o sistema foi operado em malha aberta, mantendo a velocidade de rotação do conjunto motobomba fixa em 45 Hz. Diferentes padrões de consumo foram simulados, variando o ângulo da válvula motorizada CV-1 em quatro níveis distintos: 0°, 30°, 50° e 70°. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Consumo de energia do sistema de bombeamento, medido em uma das fases do inversor de frequência, durante a operação sem ação do controlador.

CV-1 (°)	Corrente (A)	Potência (W)	Energia (kWh)
0	3.65	1652	0.2754
30	3.45	1562	0.2603
50	3.28	1485	0.2475
70	3.14	1421	0.2369

Posteriormente, com o controle operando, foi estabelecido um valor desejado de 7,8 mca, correspondente à pressão medida quando o sistema operava em malha aberta com o conjunto motobomba a 45 Hz e a válvula CV-1 totalmente aberta. Novamente, variou-se o ângulo da válvula CV-1 nos mesmos quatro valores anteriores utilizados no ensaio em malha aberta. Os resultados estão na Tabela 10.

Tabela 10. Consumo de energia do sistema de bombeamento, medido em uma das fases do inversor de frequência, durante a operação do sistema de controle proposto.

T (s)	CV-1 (°)	Corrente (A)	Potência (W)	Energia (kWh)
600	0	3.65	1652	0.2754
600	30	2.96	1340	0.2233
600	50	2.72	1231	0.2052
600	70	2.66	1204	0.2007

Analisando os resultados, observa-se que o sistema em malha fechada alcançou uma redução média de 15,51% no consumo de energia em comparação com o sistema operando sem controle de pressão. Especificamente, a redução foi de 14,20% para CV-1 em 30°, 17,07% para 50° e 15,28% para 70°.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, é possível concluir que a modelagem da planta apresentou um

desempenho satisfatório, evidenciado pelo baixo erro percentual médio absoluto (MAPE) de 0,76%. Isso indica que o modelo proposto é capaz de representar adequadamente o comportamento dinâmico da planta em estudo. Além disso, a avaliação do controlador Fuzzy tanto no modelo da planta quanto na planta real revelou resultados promissores em termos de resposta ao degrau, com tempos de subida e de assentamento aceitáveis e baixos valores de sobressinal e erro em regime permanente.

A integração do modelo virtual neste estudo proporcionou diversas vantagens adicionais, incluindo a capacidade de simular o comportamento do sistema em tempo real, de forma segura e controlada, reduzindo os custos associados aos testes práticos e acelerando o processo de desenvolvimento do controlador. Além disso, o modelo virtual possibilitou testes em uma variedade de condições operacionais, facilitando uma avaliação abrangente do desempenho do controlador. A rápida iteração na sintonia do controlador, com ajustes instantâneos de parâmetros e análise imediata do impacto no sistema, contribuiu para uma otimização eficiente e precisa.

A redução média de 15,51% no consumo de energia elétrica evidencia o potencial da metodologia proposta, especialmente para aplicações em grandes concessionárias de água. Os resultados ressaltam a relevância de modernizar os sistemas de automação em redes de distribuição, demonstrando que a integração de inversores de frequência com técnicas de inteligência artificial e Internet das Coisas (IoT) viabiliza a implementação de estratégias de controle mais refinadas, eficientes e energeticamente sustentáveis.

A metodologia foi validada em uma bancada experimental localizada no Laboratório de Eficiência no Uso da Energia e Hidrossistemas (LENHS). Apesar da escala reduzida do protótipo, a abordagem proposta é totalmente escalável para sistemas reais de distribuição de água, desde que adaptada às particularidades operacionais de cada rede. Neste estudo, a modelagem e simulação foram realizadas utilizando o ambiente MATLAB, porém a estrutura pode ser replicada com outras linguagens, como Python, o que amplia sua acessibilidade e aplicabilidade. Vale destacar que, devido ao pequeno porte do sistema experimental, a variação de frequência do inversor impacta rapidamente na pressão da rede. Em sistemas reais, entretanto, o ponto de controle precisa ser definido com maior rigor, considerando o tempo de resposta e a inércia hidráulica do sistema.

Para trabalhos futuros, sugere-se a explorar a aplicação de outras metodologias de controle, como controladores PID avançados ou técnicas de controle adaptativo, para comparar seu desempenho com o controlador Fuzzy proposto neste estudo.

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.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (2025). Gerenciamento de recursos hídricos. URL <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/1d27ae7adb7f4baeb224d5893cc21730>. Acesso em: 20 de janeiro de 2025.
- Barros Filho, E.G.d. et al. (2016). Sistema inteligente para o controle de pressão de redes de distribuição de água abastecidas por bombas associadas em paralelo.
- Brasil, I.T. (2022). Estudo de perdas de água do instituto trata brasil de 2022 (snis 2020): Desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento básico no brasil.
- Cavalcanti, D.B., Moura, J.J.P., Villanueva, J.M.M., and Gomes, H.P. (2019). Modelagem de um sistema de bombeamento para o controle de vazão por conversor de frequência baseado na teoria de identificação de sistemas. In *Anais do Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, 1.
- Flores, T.K.S., Villanueva, J.M.M., Gomes, H.P., and Catunda, S.Y.C. (2021). Adaptive pressure control system based on the maximum correntropy criterion. *Sensors*, 21(15), 5156.
- Meng, M., Zhao, P., Bai, M., and Wang, J. (2021). Fuzzy comprehensive evaluation of performance on urban water supply system. In *2021 40th Chinese Control Conference (CCC)*, 6679–6684. doi:10.23919/CCC52363.2021.9550032.
- Moreira, H.A.M., Mendonça, K.H., Gomes, H.P., Villanueva, J.M., and Silva, A.V.S. (2020). Controle autorregressivo para estabilização da pressão em sistemas de bombeamento com demanda variável. In *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, 1.
- Presidência da República (2020). Lei 14.026 de 15 de julho de 2020. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm. Acesso em: 06 de maio de 2024.
- Prudêncio, T.D.P., da Silva, J.H.B., and Villanueva, J.M.M. (2024). Controle fuzzy para otimização da pressão em sistemas de distribuição de Água. In *Anais da Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCOM)*. IFRN, Natal, RN. Acesso em: 17/06/2025.
- Santos de Araújo, J.V., Villanueva, J.M.M., Cordula, M.M., Cardoso, A.A., and Gomes, H.P. (2022). Fuzzy control of pressure in a water supply network based on neural network system modeling and iot measurements. *Sensors*, 22(23). doi:10.3390/s22239130. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9130>. Accessed on 20 January 2025.
- Xuan, X., Ma, T., Zhang, G., and Chen, S. (2024). A fuzzy proportional-integral-derivative algorithm based control method for water pump motor in waterworks. In *2024 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS)*, 1114–1119. doi:10.1109/IC2ECS64405.2024.10928507.