



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

José Hélio Bento da Silva

# **Controle Fuzzy e Modelagem da Planta para Otimização da Pressão em Sistemas de Distribuição de Água**

João Pessoa

2024

José Hélio Bento da Silva

# **Controle Fuzzy e Modelagem da Planta para Otimização da Pressão em Sistemas de Distribuição de Água**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva

João Pessoa

2024

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S586c Silva, Jose Helio Bento da.

Controle Fuzzy e Modelagem da Planta para Otimização da Pressão em Sistemas de Distribuição de Água / Jose Helio Bento da Silva. - João Pessoa, 2024.

54 f. : il.

Orientação: Juan Moisés Mauricio Villanueva Villanueva.

TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Controle Fuzzy. 2. Sistema de Abastecimento de Água. 3. Redes Neurais Artificiais. 4. Eficiência Energética. I. Villanueva, Juan Moisés Mauricio Villanueva. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 620.91(043.2)

José Hélio Bento da Silva

## Controle Fuzzy e Modelagem da Planta para Otimização da Pressão em Sistemas de Distribuição de Água

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Conceito: \_\_\_\_\_

João Pessoa, 10 de maio de 2024.

### BANCA EXAMINADORA



**Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva**  
Orientador

Documento assinado digitalmente



CARLOS ALBERTO DE SOUZA FILHO

Data: 14/05/2024 13:58:06-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Dr. Carlos Alberto Filho**  
Examinador



**Dr. Cícero da Rocha Souto**

Documento assinado digitalmente



RAFAEL MOURA DUARTE

Data: 12/05/2024 10:24:08-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Dr. Rafael Moura Duarte**  
Examinador

# Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus por ter me concedido sabedoria, força e por ter guiado meus passos ao longo de toda esta jornada.

À minha família, pelo incentivo e compreensão durante todo o período de estudo e dedicação a este trabalho. Sem o apoio de vocês, esta conquista não seria possível. Em especial ao meu pai, José Bento, e à minha mãe, Maria de Fátima, por terem sempre acreditado em mim.

Agradeço ao meu orientador professor Juan Villanueva, pela orientação valiosa, paciência e apoio ao longo de todo o processo de elaboração deste TCC. Seu conhecimento e percepções foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus professores e colegas de curso, que compartilharam suas experiências e conhecimentos, enriquecendo assim minha formação acadêmica.

Ao professor Carlos Alberto e ao Pedro, técnico do LAC (Laboratório de Automação e Controle), pelas diversas discussões sobre automação e as indústrias, as quais me ajudaram a tomar algumas decisões.

Aos amigos da turma 2018.1 pelas diversas discussões e brincadeiras, destacando-se Gabriel Murilo, Alan David e Jonas Nascimento pela companhia e ajuda que me deram nestes anos.

Por fim, agradeço a todas as instituições e pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado(a) a todos!

*“Afinal, nem tudo é tão lento no infinito firmamento.”  
(Mia Couto, em A Confissão da Leoa)*

# Resumo

A utilização de sistemas de controle está geralmente ligada a modelos eficientes e eficazes. Entretanto, 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. Os sistemas de distribuição de água apresentam um comportamento altamente dinâmico, o que torna os controladores convencionais inadequados. Com a ascensão da inteligência artificial, os controladores baseados em lógica Fuzzy têm ganhado destaque por sua eficácia em plantas não linear. Nos sistemas de abastecimento de água, que são altamente não lineares e complexos, a modelagem é particularmente desafiadora, exigindo a criação de modelos de tipo caixa-preta através de abordagens baseadas em inteligência artificial. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é criar um controlador de pressão fundamentado na lógica Fuzzy para um sistema de abastecimento de água. Para alcançar resultados concretos, foi utilizada uma planta piloto disponível no Laboratório de Eficiência Energética em Hidráulica e Saneamento (LENHS/UFPB). A pesquisa seguiu uma metodologia dividida em quatro etapas: coleta de dados, modelagem do sistema, projeto do controlador Fuzzy e implementação. A validação do controle foi realizada por meio de três cenários: teste de efetividade, que demonstrou um MAPE máximo de 1,7312% em regime permanente; análise da eficiência energética, resultando em uma economia de 15,15% em relação à operação em malha aberta; e comparação entre a inferência Mandani e Sugeno, com melhor desempenho observado para o Sugeno.

**Palavras-chave:** Controle Fuzzy. Sistema de abastecimento de água. Redes Neurais Artificiais. Eficiência Energética.

# Abstract

The use of control systems is generally linked to efficient and effective models. However, many water supply systems, essential to society, currently lack adequate control systems, resulting in process load losses and energy inefficiency. Water distribution systems exhibit highly dynamic behavior, rendering conventional controllers inadequate. With the rise of artificial intelligence, Fuzzy logic controllers have gained prominence for their effectiveness in nonlinear plants. In water supply systems, which are highly nonlinear and complex, modeling is particularly challenging, requiring the creation of black-box models through artificial intelligence-based approaches. In this context, the aim of this work is to create a Fuzzy logic-based pressure controller for a water supply system. To achieve concrete results, a pilot plant available at the Laboratório de Eficiência Energética em Hidráulica e Saneamento (LENHS/UFPB) was used. The research followed a methodology divided into four steps: data collection, system modeling, Fuzzy controller design, and implementation. Control validation was carried out through three scenarios: effectiveness testing, which demonstrated a maximum MAPE of 1.7312% in steady state; energy efficiency analysis, resulting in a 15.15% savings compared to open-loop operation; and comparison between Mandani and Sugeno inference, with better performance observed for Sugeno.

**Keywords:** Fuzzy Control. Water Supply System. Artificial Neural Networks. Energy Efficiency.

# Lista de ilustrações

Figura 1.	Caption . . . . .	2
Figura 2.	Sistema de abastecimento de água. . . . .	20
Figura 3.	Sistema de acionamento de um conjunto motor-bomba. . . . .	21
Figura 4.	Evolução do consumo com energia elétrica (AG028 e ES028) e despesas com energia elétrica (FN013) . . . . .	22
Figura 5.	Modelo de um sistema de controle baseado em lógica Fuzzy. . . . .	24
Figura 6.	Conjunto Fuzzy. . . . .	25
Figura 7.	Bancada experimental. . . . .	28
Figura 8.	Arquitetura de automação do LENHS. . . . .	29
Figura 9.	Supervisório. . . . .	29
Figura 10.	Painel de Controle . . . . .	30
Figura 11.	Placas de aquisição de dados. . . . .	30
Figura 12.	Motor trifásico. . . . .	31
Figura 13.	Inversores de frequência . . . . .	32
Figura 14.	Eletroválvula . . . . .	33
Figura 15.	Transdutor de Pressão . . . . .	34
Figura 16.	Transdutor de Vazão . . . . .	35
Figura 17.	Metodologia Proposta . . . . .	36
Figura 18.	Dados para treino da RNA . . . . .	39
Figura 19.	Topologia da RNA . . . . .	39
Figura 20.	Validação da RNA . . . . .	40
Figura 21.	Controlador proposto . . . . .	40
Figura 22.	Conjuntos . . . . .	42
Figura 23.	Conjunto de Regras . . . . .	42
Figura 24.	Resultado da simulação do controle Fuzzy . . . . .	43
Figura 25.	Cenário I . . . . .	45
Figura 26.	Sistema em malha aberta . . . . .	46
Figura 27.	Sistema em malha fechada . . . . .	47
Figura 28.	Resposta do controlador do tipo Mandani . . . . .	48
Figura 29.	Resposta do controlador do tipo Sugeno . . . . .	49

# Lista de tabelas

Tabela 1.	Especificações das placas de aquisição de dados . . . . .	31
Tabela 2.	Especificações da bomba . . . . .	32
Tabela 3.	Especificações do motor . . . . .	32
Tabela 4.	Especificações do inversor . . . . .	33
Tabela 5.	Especificações do eletroválvula . . . . .	33
Tabela 6.	Especificações do transdutor de pressão . . . . .	34
Tabela 7.	Especificações do transdutor de vazão . . . . .	35
Tabela 8.	Conjunto Erro. . . . .	41
Tabela 9.	Conjunto Derro. . . . .	41
Tabela 10.	Conjunto $\Delta f$ . . . . .	42
Tabela 11.	Métricas para análise de desempenho do controlador . . . . .	45
Tabela 12.	Consumo do sistema em malha aberta . . . . .	47
Tabela 13.	Consumo do sistema em malha fechada . . . . .	47
Tabela 14.	Métricas do Controle Fuzzy Mandani . . . . .	49
Tabela 15.	Métricas do Controle Fuzzy Sugeno . . . . .	49
Tabela 16.	Metricas para Inferência Sugeno e Mandani . . . . .	50

# Lista de abreviaturas e siglas

RNA	Redes Neurais Artificiais
PID	Proportional-Integral-Derivative
ITB	Instituto Trata Brasil
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ARMAX	AutoRegressive Moving Average Model with eXogenous Input
TCP	Transmission Control Protocol
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
MAPE	Erro Percentual Absoluto Médio
MSE	Erro Médio Quadrático
RMSE	Raiz do Erro Médio Quadrático
IAE	Integral do Erro Absoluto
ITAE	Integral do Erro Absoluto Ponderado pelo Tempo
CMB	Conjunto Motorbomba
ENG	Erro Negativo Grande
ENM	Erro Negativo Médio
EZ	Erro Zero
EPM	Erro Positivo Médio
EPG	Erro Positivo Grande
DENG	Derivada do Erro Negativo Grande
DENM	Derivada do Erro Negativo Médio
DEZ	Derivada do Erro Zero
DEPM	Derivada do Erro Positivo Médio

DEPG	Derivada do Erro Positivo Grande
DG	Decremento Grande
DM	Decremento Médio
Z	Zero
IG	Incremento Médio
IG	Incremento Grande
$T_t$	Tempo de Transição
$T_a$	Tempo de Assentamento
$T_s$	Tempo de Subida

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>15</b>
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
<b>1.2</b>	<b>Estrutura e Organização do Trabalho</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>20</b>
<b>3.1</b>	<b>Sistema de Abastecimento de Água</b>	<b>20</b>
<b>3.2</b>	<b>Consumo de Energia Elétrica em Sistemas de Distribuição de Água</b>	<b>22</b>
<b>3.3</b>	<b>Modelagem Baseada em RNA</b>	<b>23</b>
<b>3.4</b>	<b>Controle Fuzzy</b>	<b>23</b>
3.4.1	Fuzzificação	24
3.4.2	Inferência	24
3.4.3	Defuzzificação	25
3.4.4	Procedimento para Projeto de Controle Fuzzy	25
<b>3.5</b>	<b>Métricas de avaliação de sistemas de controle</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>28</b>
<b>4.1</b>	<b>Bancada Experimental</b>	<b>28</b>
4.1.1	Supervisor	29
4.1.2	Aquisição	30
4.1.3	Planta	31
4.1.3.1	Conjunto Motorbomba	31
4.1.3.2	Inversor de Frequência	32
4.1.3.3	Eletroválvula	33
4.1.3.4	Transdutor de Pressão	34
4.1.3.5	Transdutor de Vazão	34
<b>4.2</b>	<b>Metodologia para Implementação de Sistemas de Controle</b>	<b>35</b>
4.2.1	Coleta de Dados	36
4.2.2	Modelagem da Planta	36
4.2.3	Projeto do Controlador	37
4.2.4	Implementação na Planta	37
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>38</b>

<b>5.1</b>	<b>Modelagem do Sistema</b> . . . . .	<b>38</b>
5.1.1	Coleta de Dados . . . . .	38
5.1.2	Modelagem da Planta . . . . .	38
5.1.3	Projeto do Controlador . . . . .	40
<b>5.2</b>	<b>Implementação</b> . . . . .	<b>43</b>
5.2.1	Cenário I . . . . .	44
5.2.2	Cenário II . . . . .	45
5.2.3	Cenário III . . . . .	47
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>52</b>

# 1 Introdução

Em 15 de julho de 2020 foi aprovada a Lei 14.026 que alterou o Marco Legal do saneamento, adotando integralmente a pauta da desestatização do setor. Com esta mudança, foi definido que, até o ano 2033, 99% da população brasileira seja atendida com água potável e 90% com coleta e tratamento de esgoto. Além disso, as perdas na distribuição de água deve se limitar à 25% da água fornecida.

Entretanto, o levantamento divulgado pelo Instituto Trata Brasil (2022), com ano base em 2022, mostrou que mais de 37% da água captada pelos reservatórios brasileiros é desperdiçada ao longo de todo o processo até chegar ao consumidor. Essas informações destacam a urgência de ações coordenadas para enfrentar os desafios do desperdício, visando garantir o acesso sustentável à água potável para as gerações atuais e futuras.

O Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS) (2021) identifica dois tipos de perdas no sistema de abastecimento de água: perdas aparentes, que representam volumes de água consumidos mas não medidos e contabilizados, e perdas reais, que se referem aos volumes de água perdidos ao longo dos sistemas de abastecimento e não consumidos. Com relação às perdas reais, CAVALCANTI et al.(2019), enfatiza que a eficiência nas redes de distribuição de água está associada às perdas por fugas de água, deteriorização da rede, consumo energético do conjunto motor-bomba e ao controle da pressão e vazão. Além disso, aponta-se que esses dois parâmetros são eficientemente controlados a partir do controle da velocidade do conjunto motor-bomba.

Quanto ao consumo de energia elétrica, pesquisas realizadas pelo Balanço Energético Nacional 2021 EPE (2021) e o SNIS (2021) apontam que os serviços de saneamento absorveram cerca 2,43% de toda a energia consumida no país. Além disso, BEZERRA et al. (2015) destaca que 90% desse consumo é resultante da operação do conjunto motor bomba. Dessa forma, é evidente que a ineficiência dos sistemas de bombeamento de água é um dos fatores que corrobora esse índice concomitante à gestão de água.

Concomitante ao problema do consumo energético, há as perdas por fugas de água que, em muitos casos, as tubulações estão obstruídas por consequência de pressões elevadas, assim como destaca SOBRINHO et al. (2016).

Dessa forma, assim como destacou o SNIS (2021), as concessionárias de água devem investir na melhoria da eficiência energética e no controle de pressão por meio de técnicas de controle e telemetria nas redes de distribuição. Contudo, a disseminação das metodologias abordadas na literatura é essencial para atingir as metas definidas pela Lei 14.026.

Na literatura, alguns métodos para controle da pressão estão se destacando, como: aplicação da lógica Fuzzy em ARAÚJO et al. (2022), redes neurais artificiais em FILHO et al. (2016), controle adaptativo em FLORES et al. (2021) e controle PID em MONTEIRO (2016). A escolha da maioria desses métodos é justificada pela ocorrência de mudanças no sistema de abastecimento e a presença de ruídos na medição das variáveis causando ineficiência e instabilidades no processo.

Além das técnicas de controle, estão sendo abordadas metodologias para modelagem do sistema de distribuição de água, tais como a modelagem baseada em redes neurais, conforme discutido em ARAÚJO et al. (2022), e a identificação de sistemas utilizando o modelo ARMAX (AutoRegressive Moving Average Model with eXogenous Input), como apresentado em CAVALCANTI et al.(2019). Já a modelagem matemática é inviável visto que para cada ponto de operação, as equações que descrevem o sistema se alteram FILHO et al. (2016).

Diante do exposto, este trabalho apresenta uma metodologia para projeto de um controlador de pressão baseado em lógica Fuzzy englobando a coleta de dados, modelagem, projeto e implementação. Para isso, foram realizados testes experimentais em uma rede de distribuição de água localizado no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) na Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Neste trabalho, o objetivo principal é o desenvolvimento de controle inteligente visando otimizar a pressão em redes de distribuição de água e aprimorar a eficiência energética nos sistemas de bombeamento de água.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

No desenvolvimento de um projeto de controle, diversas etapas devem ser consideradas, como compreender o processo e os materiais envolvidos, modelar a planta, selecionar o tipo de controle mais apropriado, realizar o projeto, realizar simulações e fechar o circuito de controle na planta. Nesse contexto, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Aplicar a metodologia em 4 passos;
  - Coleta de dados;
  - Modelagem;
  - Projeto do controlador

– Implantação

- Analisar a eficiência energética em sistemas de controle em malha aberta e fechada;
- Comparar o desempenho dos projetos dos controladores Fuzzy do tipo Mandani e Sugeno.

## 1.2 Estrutura e Organização do Trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, organizados da seguinte maneira:

O Capítulo 1 introduz o tema, abordando o consumo de energia elétrica no sistema de abastecimento de água e os métodos propostos na literatura para mitigar esse consumo. Além disso, são apresentados os objetivos deste estudo.

No Capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica abrangente, discutindo os trabalhos relevantes encontrados na literatura relacionados ao tema deste trabalho.

No Capítulo 3, são apresentados os fundamentos teóricos essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

No Capítulo 4, são detalhados os materiais utilizados e a metodologia adotada. Os materiais compreendem a bancada experimental localizada no LENHS, enquanto a metodologia descreve o processo de projeto e implementação do controle, dividido em quatro etapas.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos. Isso inclui os resultados da modelagem da planta e os resultados do controle implementado.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões deste trabalho, destacando os principais resultados alcançados.

## 2 Revisão Bibliográfica

Em linhas gerais, a principal fonte de estudos correlatos se baseia em publicações que empregam técnicas de previsão para modelagem do sistema, bem como controles inteligentes e adaptativos. Assim, nesta seção, serão apresentadas análises dos estudos encontrados na literatura que tratam desse tema.

Em (ARAÚJO et al., 2022), é proposto o desenvolvimento de um sistema de controle de pressão para uma rede de distribuição de água, com foco em uma Estação Elevatória de Água (EEA). A solução utiliza técnicas de modelagem baseadas em redes neurais artificiais (RNA) e controle fuzzy. Inicialmente, um modelo é criado com base em dados históricos da rede de distribuição de água, seguido pelo desenvolvimento de um controlador fuzzy em Python para atuar sobre os inversores de frequência responsáveis pelo controle da pressão na rede. A comunicação entre o controlador fuzzy e os inversores de frequência é realizada utilizando protocolos como Modbus TCP (Protocolo de Controle de Transmissão) e HTTP (Protocolo de Transferência de Hipertexto). Os resultados mostram que o controlador fuzzy melhorou a estabilidade da pressão na rede e reduziu o consumo de energia em comparação com o controle já implementado na planta. No entanto, foram identificadas limitações relacionadas a instabilidades no controle da pressão devido a falhas na comunicação entre o controlador fuzzy e o sistema supervisor, destacando a necessidade de otimizar a operação e a segurança do sistema.

(FLORES et al., 2021) propõe o desenvolvimento de um sistema de controle adaptativo indireto, denominado IMRAC-PID-MCC, para o controle da pressão hidráulica em sistemas de abastecimento de água. A solução utiliza conceitos da Teoria da Informação, especificamente a Máxima Correntropia, para guiar a identificação em tempo real do sistema e a atualização dos parâmetros do controlador PID. Os resultados experimentais demonstram que o controlador IMRAC-PID-MCC apresentou uma convergência média de 95.45% em relação ao modelo de referência, indicando sua eficácia no rastreamento da pressão desejada. No entanto, a complexidade de implementação e ajuste dos parâmetros do controlador pode representar uma limitação quanto a implementação e disseminação desta metodologia nos ambientes industriais.

Em (MOREIRA et al., 2020) se teve como proposta implementar uma técnica de controle inovadora em sistemas de abastecimento de água, visando a estabilização das pressões de serviço. Para desenvolver a solução, os pesquisadores utilizaram modelagem computacional, especificamente um controlador ARX (Auto-Regressive with eXogenous input), que foi desenvolvido a partir de um banco de dados construído com um controlador primário Fuzzy. Além disso, um controlador Neural foi projetado para fins de comparação,

utilizando os mesmos dados de treinamento. Os resultados demonstraram que o controlador ARX apresentou o melhor desempenho para estabilizar as pressões de serviço, mantendo um baixo percentual de erro, geralmente abaixo de 1.3%, e mostrando uma resposta rápida e estável em diferentes condições de operação. O ajuste ( $R^2$ ) na etapa de treinamento do controlador ARX foi de 89%, indicando uma boa capacidade de capturar a dinâmica do sistema e prever seu comportamento sob diferentes condições. Uma das limitações ou desvantagens dessa proposta pode ser a necessidade de um banco de dados extenso e representativo para treinar o controlador ARX, o que pode demandar tempo e recursos significativos. Além disso, a complexidade do processo de modelagem computacional pode tornar a implementação e manutenção do sistema mais desafiadoras em comparação com abordagens mais tradicionais de controle.

(FILHO et al., 2016) propôs o desenvolvimento de um sistema de controle inteligente para sistemas de bombeamento em abastecimento de água, utilizando redes neurais artificiais (RNA), especificamente a Rede Perceptron Multicamadas (PMC). A solução foi implementada através da utilização de dados experimentais em diferentes condições de funcionamento, realizando experimentos em uma bancada experimental que emula um sistema real de abastecimento de água. Os resultados indicaram que a arquitetura da RNA foi adequada para a aplicação, apresentando um desempenho satisfatório em uma variedade de operações experimentais em que o erro médio em regime permanente foi 2,42%. No entanto, uma limitação significativa desta abordagem foi a falta de uma regra clara para a escolha do número apropriado de neurônios na camada oculta da RNA PMC, o que pode exigir métodos de tentativa e erro para determinar o número ideal de neurônios.

O trabalho desenvolvido por (MONTEIRO et al., 2016) propôs estudar a aplicação de um algoritmo de controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) em estações elevatórias de água para sistemas de abastecimento. A solução foi desenvolvida mediante a implementação do controle PID na rede experimental no LENHS, simulando um sistema de abastecimento real, com ajuste dos parâmetros do controlador para garantir o controle das pressões. Os resultados indicaram que o sistema com o controlador PID apresentou significativa redução no consumo energético (67,95%) em comparação com o sistema sem controle, além de garantir o controle eficiente das pressões. Uma desvantagem da implementação do PID é a não linearidade do sistema de abastecimento de água, essa característica, em paralelo com possíveis perturbações, pode tornar o PID ineficiente.

Considerando o exposto, foi possível identificar tanto as oportunidades quanto os desafios no desenvolvimento de sistemas de controle em redes de distribuição de água, visto que envolve a aplicação de técnicas tradicionais de controle, como o PID, e abordagens mais avançadas, como a lógica Fuzzy. Além disso, devido à abundância de dados disponíveis nos sistemas de automação, é factível criar modelos de sistemas utilizando redes neurais

artificiais que conseguem lidar com a complexidade não linear desses sistemas. Neste trabalho de conclusão de curso, será apresentada uma metodologia para a implementação de sistemas de controle de pressão em redes de distribuição, considerando a identificação de sistema com redes neurais e controladores baseados em lógica fuzzy.

## 3 Fundamentação teórica

Neste capítulo, serão estabelecidos os fundamentos teóricos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, abordando aspectos relacionados ao funcionamento dos sistemas de abastecimento de água, ao consumo de energia elétrica nesse contexto, às abordagens de modelagem baseadas em RNA, ao controle Fuzzy e às métricas utilizadas para avaliar a eficácia do controle.

### 3.1 Sistema de Abastecimento de Água

Um sistema de abastecimento de água desempenha um papel crucial no fornecimento de água potável para comunidades, bairros e cidades. Esses sistemas operam por meio de uma série de etapas, desde a captação da água bruta até a distribuição aos consumidores finais. Na Figura 2, ilustra-se um sistema de abastecimento de água contemplando todas as etapas.

**Fonte:** (TSUTIYA, 2004)

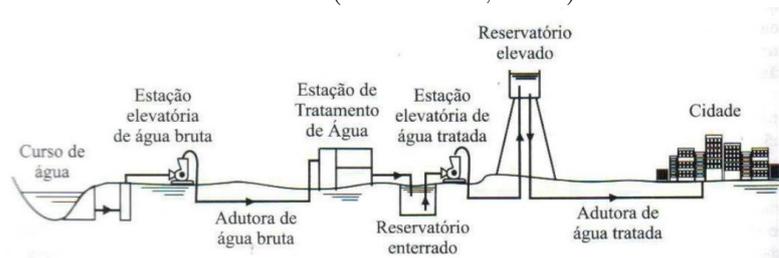


Figura 2. Sistema de abastecimento de água.

A partir da Figura 2, observa-se que o sistema é representado pelas seguintes componentes:

- **Captação:** A água é captada a partir de fontes naturais, como rios, lagos, represas ou aquíferos subterrâneos. Dependendo da fonte, podem ser necessários processos de tratamento preliminar, como peneiramento e desarenamento, para remover materiais sólidos;
- **Tratamento:** A água bruta passa por um processo de tratamento para remover impurezas, substâncias químicas, microrganismos e outros poluentes. O tratamento inclui etapas como coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção;
- **Reservação:** A água tratada é armazenada em reservatórios ou torres de água para garantir o suprimento contínuo e regularidade do abastecimento. Esses reservatórios

podem ser elevados, localizados em áreas elevadas, ou subterrâneos, utilizando a pressão para distribuição;

- Rede de distribuição: A água é distribuída por uma extensa rede de tubulações que abrange toda a região a ser atendida. Essas tubulações são conectadas a ramais que se estendem até as residências, comércios e outros pontos de consumo.

Além dos pontos destacados acima, esses sistemas contam com manutenções preventivas nas tubulações, reservatórios e demais componentes. Contam, também, com monitoramento de qualidade para garantir os padrões de potabilidade.

Para o funcionamento adequado dos pontos de elevação e das redes de distribuição, há a presença de diversos conjuntos motor-bombas cuja função é fornecer a energia ao líquido para que possa ser realizado o trabalho de movê-lo, continuamente, do reservatório inferior até a saída do tubo de recalque, vencendo todas as resistências encontradas no caminho para chegar no ponto final com uma vazão desejada (CAVALCANTI et al., 2019). O acionamento dessas máquinas é geralmente realizado por um inversor de frequência ou *softstart*. Uma das vantagens dos inversores é a capacidade de permitir controle de velocidade por meio de um controle tradicional ou baseadas em técnicas de inteligência artificial. Um esquema de acionamento da bomba é demonstrado na Figura 3.

**Fonte:** (CAVALCANTI et al., 2019)

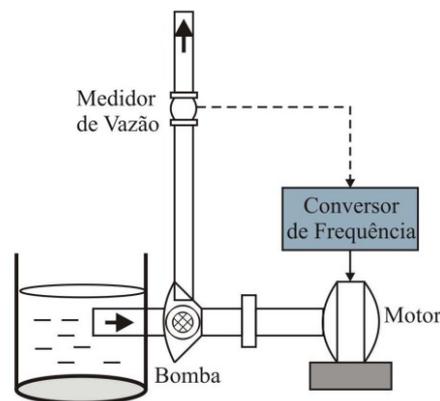


Figura 3. Sistema de acionamento de um conjunto motor-bomba.

Em projetos atuais desse tipo de planta, há o interesse no monitoramento de pressões e vazões em diferentes trechos na distribuição. Dessa forma, diversos métodos de medições e diferentes tipos de transdutores estão sendo aplicado nas tubulações, entre os quais os métodos menos invasivos tem se destacado por facilidade nas instalações e por não causar perdas de cargas. Com a presença dos transdutores é possível controlar a velocidade de rotação da bomba para manter uma determinada pressão ou vazão de referência em um determinado ponto. Na Figura 3 ilustra-se um esquema de acionamento da bomba com velocidade controlada em que a vazão é a variável a ser controlada.

## 3.2 Consumo de Energia Elétrica em Sistemas de Distribuição de Água

Com o novo marco legal do saneamento, promulgado em julho de 2020, houve uma maior abertura para a participação da iniciativa privada na prestação dos serviços de saneamento básico em todo o país. Isso pode trazer novas oportunidades e incentivos para a modernização e melhoria da eficiência dos sistemas de distribuição de água, incluindo a adoção de práticas mais sustentáveis e o uso mais eficiente de energia elétrica.

A ineficiência dos sistemas de bombeamento de água é uma das principais causas desse alto consumo de energia. Fatores como perdas de carga, vazamentos e ineficiências nos equipamentos contribuem para um uso excessivo de energia elétrica. Além disso, a falta de manutenção adequada e o uso de tecnologias obsoletas também podem aumentar o consumo de energia.

Para enfrentar esse desafio, medidas de eficiência energética e otimização dos sistemas de bombeamento são essenciais. Isso pode incluir a adoção de tecnologias mais eficientes, como bombas de velocidade variável e sistemas de controle avançados, bem como práticas de manutenção preventiva para garantir o funcionamento adequado dos equipamentos. Além disso, estratégias de gestão de demanda de energia e a integração de fontes de energia renovável também podem contribuir para a redução do consumo de energia nos sistemas de distribuição de água.

Na Figura 4, ilustra-se esse crescimento ao longo do período de 2008 a 2021. Os dados revelam que, em 2018, o consumo de energia elétrica para o abastecimento de água atingiu a marca de 12,6 TWh, enquanto para o tratamento de esgoto foi de 1,6 TWh. Esse aumento significativo no consumo energético reflete não apenas o crescimento populacional e urbanização, mas também os desafios enfrentados pelos sistemas de saneamento para garantir um fornecimento adequado de água e tratamento de esgoto em todo o país.

**Fonte:** Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS).

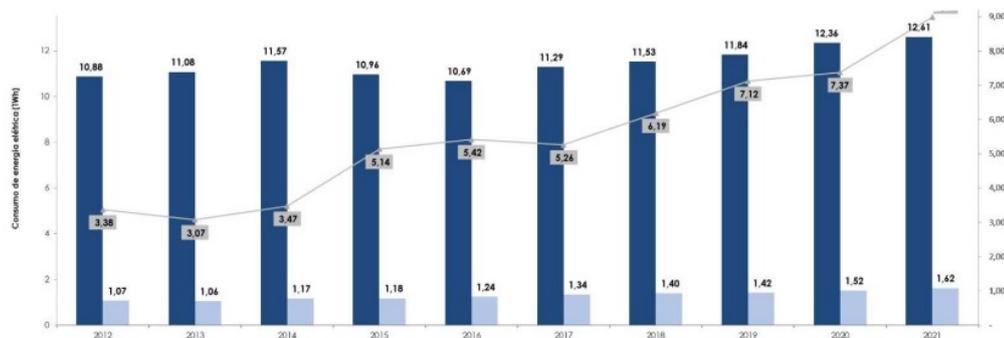


Figura 4. Evolução do consumo com energia elétrica (AG028 e ES028) e despesas com energia elétrica (FN013)

### 3.3 Modelagem Baseada em RNA

Para otimizar a operação de processos industriais reais, simulações de modelos virtuais das instalações são cruciais. Essas simulações permitem uma análise detalhada do comportamento do sistema diante de diferentes entradas, produzindo saídas correspondentes. Esse processo de modelagem reduz consideravelmente o risco de comportamento inesperado durante a operação real, garantindo uma implementação confiável.

A rede neural artificial (RNA) surge como uma ferramenta computacional para essa modelagem. Em comparação com outras técnicas, como equações diferenciais ou funções de transferência, as RNAs destacam-se em sistemas complexos e não lineares, como processos hidráulicos ou redes extensas de abastecimento de água (FLORES et al., 2021). Elas são capazes de lidar eficientemente com a dinâmica temporal e as múltiplas variáveis envolvidas, proporcionando uma representação precisa e eficaz do sistema em questão.

Essa ferramenta computacional pode ser treinada com dados históricos de operação do sistema de abastecimento de água para aprender padrões complexos de interação entre as variáveis. Isso permite prever o comportamento do sistema sob diferentes condições, como variações na vazão, demanda e pressão. Permitindo, portanto, a simulação e desenvolvimento de controladores sem a necessidade de parar a produção do sistema.

Para avaliar a qualidade das previsões geradas por redes neurais artificiais (RNAs), uma métrica comumente empregada é o erro percentual absoluto médio (MAPE), que permite avaliar a precisão das previsões em termos percentuais.

### 3.4 Controle Fuzzy

A lógica Fuzzy é uma técnica que incorpora a abordagem de pensamento humano a um sistema de controle. Um controlador Fuzzy típico pode ser projetado para se comportar de acordo com o raciocínio dedutivo, ou seja, o processo pelo qual as pessoas inferem conclusões com base nas informações que já possuem (SIMÕES; SHAW, 2007). Por exemplo, uma pessoa pode medir a altura de outra usando uma fita métrica e categorizá-la como alta, baixa, média, um pouco alta, um pouco baixa, etc. A lógica Fuzzy, se aplicada a esse contexto, também fará classificações semelhantes.

Dessa forma, uma vez que o controle Fuzzy opera com termos linguísticos, é possível superar as limitações associadas aos métodos de controle convencionais em sistemas não lineares. No entanto, é fundamental contar com a experiência de um especialista no processo a ser controlado para garantir a correta definição dos conjuntos, regras e funções de pertinência envolvidos.

Na Figura 5, pode ser observado que a lógica Fuzzy é composta por três elementos-

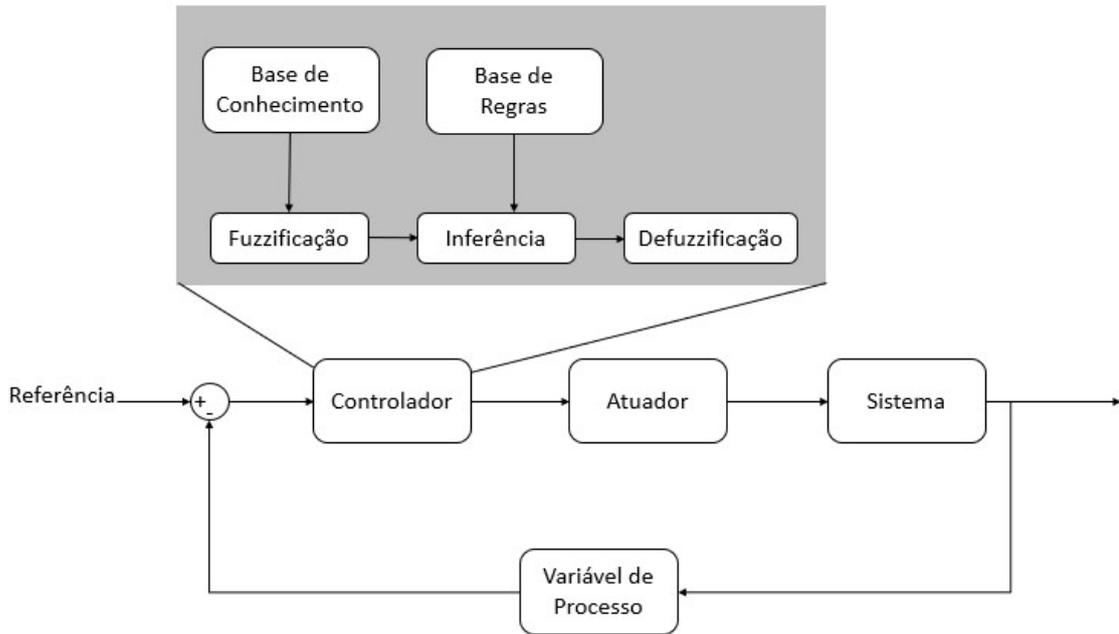


Figura 5. Modelo de um sistema de controle baseado em lógica Fuzzy.

chave: Fuzzificação, Inferência e Defuzzificação. A seguir, cada um desses pontos será brevemente explorado.

### 3.4.1 Fuzzificação

A fuzzificação é um passo essencial no controle Fuzzy, no qual valores de entrada, como temperatura ou velocidade, são convertidos em graus de pertinência nos conjuntos Fuzzy predefinidos. Esse processo permite que o sistema aborde a incerteza e a imprecisão dos dados de entrada, oferecendo uma representação mais flexível e adaptável do mundo real. Por exemplo, ao controlar a temperatura de um ambiente e definir conjuntos Fuzzy para "Baixa", "Média" e "Alta", a fuzzificação transformaria uma leitura específica, como 30°C, em graus de pertinência para cada conjunto. Assim, no exemplo da Figura 6, 30°C pode ter um grau de pertinência de 0.5 no conjunto "Média".

### 3.4.2 Inferência

Na literatura são abordadas, geralmente, dois tipos de inferência: Mandani e Sugeno. (SCHOEN, 2023) aponta a inferência pelo método Mandani, nomeada em homenagem a Ebrahim H. Mamdani, opera com regras linguísticas do tipo se <antecedente> então <consequente>, onde as variáveis de entrada são combinadas para produzir um conjunto de saídas Fuzzy. Com isso, o método Mandani é particularmente útil em situações onde as regras do sistema são descritas de maneira linguística e as saídas são incertas ou imprecisas.

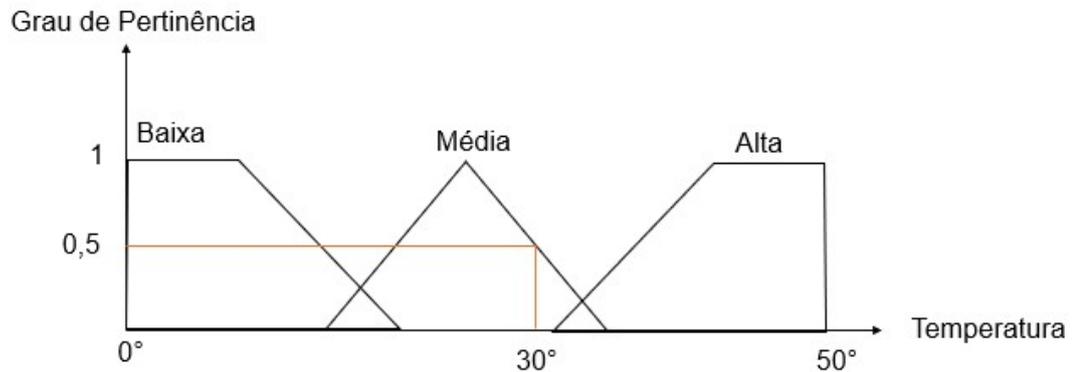


Figura 6. Conjunto Fuzzy.

Por outro lado, no método Sugeno, nomeado em homenagem a T. Sugeno, a inferência é feita por meio de funções lineares ou constantes como saída, combinando as variáveis de entrada de maneira ponderada. Isso torna o método Sugeno mais adequado para situações onde a relação entre as variáveis de entrada e saída pode ser modelada de forma mais precisa por meio de funções matemáticas.

### 3.4.3 Defuzzificação

Na etapa de defuzzificação, os resultados Fuzzy gerados pela inferência são transformados em valores de saída compreensíveis para o atuador. Em consonância com as observações de Schoenauer e Besson (2023), no contexto da inferência pelo método Mamdani, comumente é empregado o método do Centro de Gravidade. Esse método calcula o valor de saída considerando o centro de gravidade dos conjuntos Fuzzy resultantes. Por outro lado, no caso da inferência pelo método Sugeno, é utilizada a técnica da média ponderada. Nessa abordagem, os valores de saída são determinados por uma média ponderada dos valores das regras de inferência, sendo os pesos atribuídos com base nos graus de pertinência.

### 3.4.4 Procedimento para Projeto de Controle Fuzzy

Por fim, (SCHOEN, 2023), aborda um passo a passo para elaboração de um controlador Fuzzy.

1. **Escolha uma Variável e Defina as Variáveis de Entrada, Saída e Estado:** Identifique a variável a ser controlada e defina as variáveis que a influenciam, bem como quaisquer variáveis de estado relevantes.

2. **Divida o Universo de Discurso em Subconjuntos Fuzzy:** Para cada variável, divida o intervalo de valores possíveis em subconjuntos Fuzzy com nomes linguísticos.
3. **Atribua Funções de Associação para Cada Subconjunto Fuzzy:** Determine como os valores se relacionam com os subconjuntos Fuzzy e atribua funções de associação apropriadas.
4. **Fuzzifique as Variáveis de Entrada:** Converta os valores de entrada em valores Fuzzy usando as funções de associação definidas.
5. **Raciocínio Aproximado Fuzzy:** Aplique as regras de inferência Fuzzy para determinar a saída de cada regra.
6. **Agregação:** Combine as saídas Fuzzy de todas as regras para obter uma saída Fuzzy agregada.
7. **Defuzzificação:** Converta a saída Fuzzy agregada em um valor nítido que represente a ação a ser tomada.

### 3.5 Métricas de avaliação de sistemas de controle

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 of Absolute Error*), o Índice ITAE (*Integral of Time-weighted Absolute Error*) e o MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*).

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. A fórmula para o Índice IAE é (CHAIB; CHOUCHA; ARIF, 2017):

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (3.1)$$

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. A fórmula para o Índice IAE é (CHAIB; CHOUCHA; ARIF, 2017):

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)| dt \quad (3.2)$$

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. A fórmula para o MAPE é (JACKSON et al., 2019):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_p[i] - y_m[i]}{y_p[i]} \right| \quad (3.3)$$

## 4 Materiais e Métodos

### 4.1 Bancada Experimental

Este estudo foi conduzido na bancada experimental representada na Figura 7, localizada no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS). A estrutura da bancada inclui um conjunto motor-bomba (CMB), quatro transdutores de pressão, três eletroválvulas, três válvulas mecânicas, dois transdutores de vazão e o conjunto de materiais que compõem a tubulação.

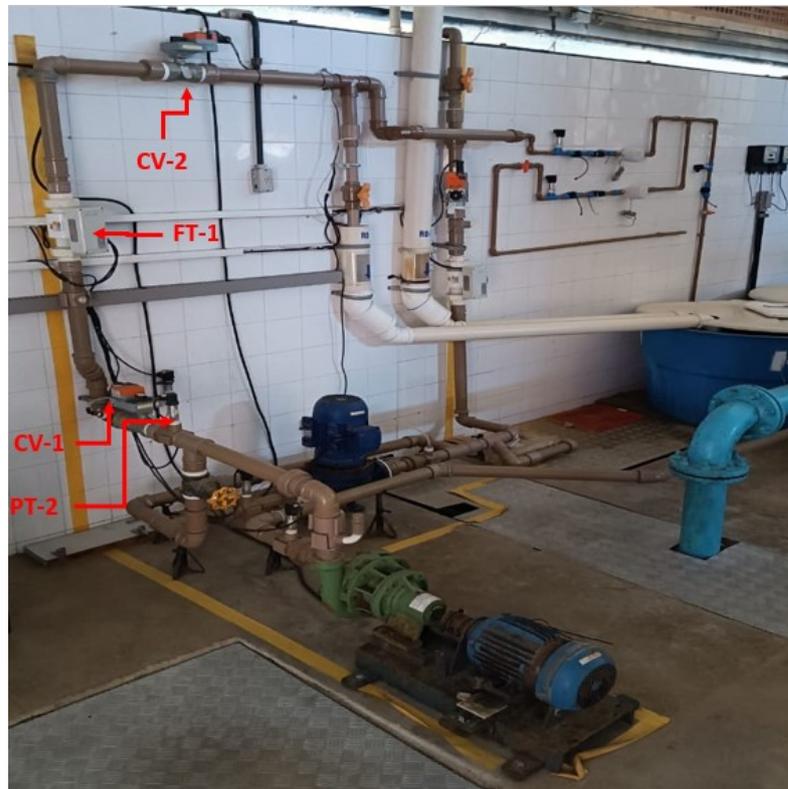


Figura 7. Bancada experimental.

Essa 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.

Do ponto de vista de automação, a bancada experimental pode ser compreendida

em três blocos principais responsáveis por diferentes aspectos do sistema como é ilustrado na Figura 8. Em primeiro lugar, temos o bloco Supervisório, que atua como o cérebro do sistema, fornecendo monitoramento e controle. Em seguida, o bloco Sistema de Aquisição é responsável pela coleta e processamento de dados, permitindo uma análise detalhada das condições operacionais. Por fim, o bloco Planta representa o ambiente físico do sistema, onde ocorrem as interações entre os componentes.



Figura 8. Arquitetura de automação do LENHS.

#### 4.1.1 Supervisório

A Figura 9 representa a tela principal do sistema de monitoramento e controle desenvolvido no software Labview. Com este sistema supervisório, é possível ligar o sistema em malha aberta e acompanhar a tendência dos sinais de pressão e vazão e atuar nas eletroválvulas.

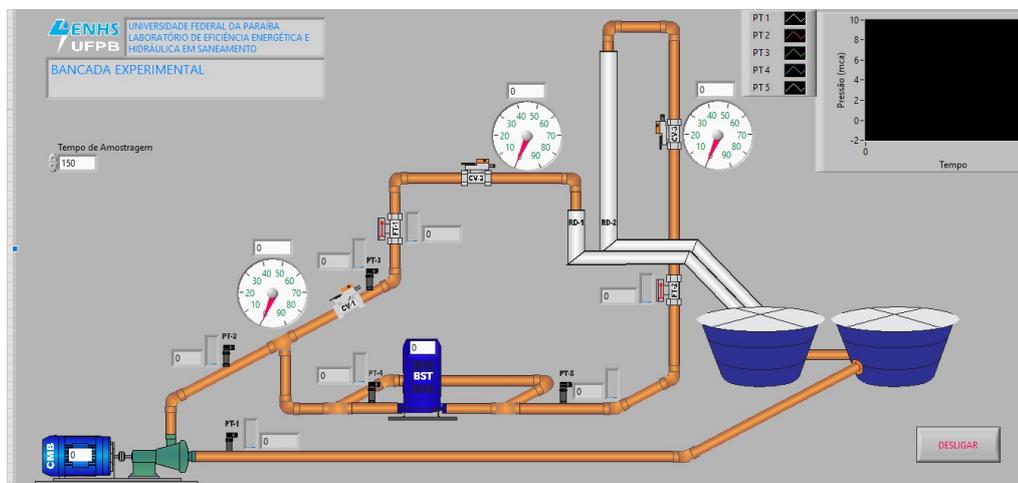


Figura 9. Supervisório.

Já na tela de controle, apresentada na Figura 10, é possível controlar o sistema a partir de um controle PID, Fuzzy com inferência do tipo Mandani ou Sugeno.

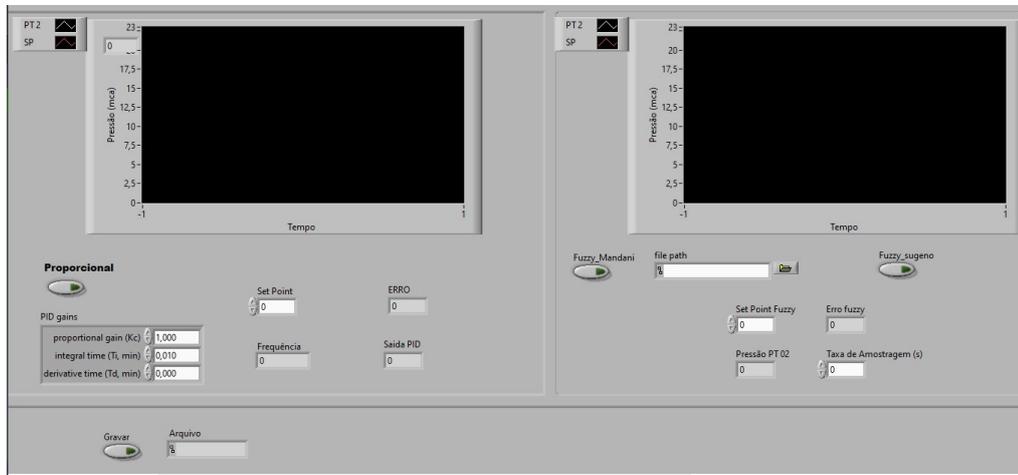


Figura 10. Painel de Controle

#### 4.1.2 Aquisição

A unidade de aquisição atua como intermediária entre a planta e o sistema de supervisão, recebendo e enviando dados. Na bancada, são utilizadas duas placas de aquisição, NI USB-6229 e NI USB-6221, da National Instruments, conforme ilustrado na Figura 11. Estas placas de aquisição de dados são compostas por canais de entradas e saídas analógicas e digitais, permitindo a captura e controle de sinais de forma eficiente.



Figura 11. Placas de aquisição de dados.

Na Tabela 1, são apresentadas as demais características dessas placas.

Tabela 1. Especificações das placas de aquisição de dados

Características	NI USB-6229	NI USB-6221
Alimentação	220 AC	220 Ac
Canais de saída analógica	4	4
Canais de entrada analógica	32	32
Canais de entrada digital	32	32
Taxa de amostragem	50 ns	50 ns
Tensão de entrada	$\pm 10$ V	$\pm 10$ V
Tensão de saída	0 - 5V	0 5V
Corrente de saída	$\pm 20$ mA	$\pm 20$ mA
Transferência de dados	USB	USB

### 4.1.3 Planta

Nesta secção estão compreendidos os demais componentes que estão associadas diretamente com a planta.

#### 4.1.3.1 Conjunto Motorbomba

O conjunto motobomba desempenha um papel fundamental no sistema em análise, consistindo de uma bomba centrífuga acoplada a um motor de indução trifásico. A função primária deste conjunto é fornecer potência mecânica à bomba, que por sua vez, gera potência hidráulica ao fluido na forma de vazão e pressão, atendendo assim as demandas dos diferentes ramais do sistema. A Figura 12 ilustra este dispositivo, enquanto as Tabelas 2 e 3 apresentam as especificações técnicas detalhadas da bomba e do motor trifásico, respectivamente.



Figura 12. Motor trifásico.

Tabela 2. Especificações da bomba

Fabricante	Schneider
Modelo	BC - 21R
DN de Recalque	1 1/2"
DN de Sucção	2"
Vazão Máxima	41,5 m <sup>3</sup> /h
Altura Máxima	23 mca
Rotação Nominal	3450 rpm

Tabela 3. Especificações do motor

Fabricante	WEG
Potência	3 CV
Tensão	380 VAC
Corrente	4,86 A
Rotação Nominal	3450 rpm
Frequência	60 HZ
Fator de Potência	0,84
Temperatura Ambiente	Até 40 °C

#### 4.1.3.2 Inversor de Frequência

O controlador de frequência é um equipamento eletrônico empregado para modular a velocidade de operação do motor elétrico, garantindo uma rotação constante com torque estável. Na configuração desta bancada experimental, são utilizados dois controladores de frequência, conforme mostrado na Figura 13, sendo um designado para regular a velocidade do motor elétrico conectado à bomba, enquanto o segundo está destinado ao *booster*, embora não seja utilizado neste estudo. As principais especificações técnicas desses dispositivos estão detalhadas na Tabela 4.



Figura 13. Inversores de frequência

Tabela 4. Especificações do inversor

Fabricante	WEG
Modelo	CFW 08
Tensão	220 240, 380 480, 500 600 VAC
Corrente	1 - 33 A
Rotação Nominal	3450 rpm
Frequência	3 - 60 HZ

#### 4.1.3.3 Eletroválvula

Na Figura 7, observamos a presença de três eletroválvulas, uma localizada na zona alta (CV-3) e duas na zona baixa (CV-1 e CV-2). Essas válvulas permitem a modificação do fluxo do fluido e a regulação da pressão em diferentes trechos, emulando assim os padrões de consumo típicos do dia a dia.

A Figura 14 oferece uma visualização detalhada desse tipo de válvula. De maneira concisa, a válvula pode ser ativada remotamente por meio de sinais de 0 a 10V DC e, em resposta, retorna um sinal de 2 a 10V DC que indica o grau de fechamento. As especificações técnicas estão detalhadas na Tabela 5.



Figura 14. Eletroválvula

Tabela 5. Especificações do eletroválvula

Fabricante	Belimo
Modelo	ARB-24
Sinal de Entrada	0 - 10V DC
Sinal de saída	2 - 10V DC
Grau de Abertura	0°
Grau de Fechamento	90°

#### 4.1.3.4 Transdutor de Pressão

Nesta bancada, emprega-se um transdutor de pressão do tipo piezorresistivo. Esse componente se caracteriza pela sensibilidade à deformação mecânica do elemento sensor, resultando em variações na sua resistência elétrica. Conseqüentemente, ao submeter o sensor a uma diferença de potencial, é possível medir a altura manométrica ou a pressão correspondente à variação da resistência. O modelo específico do transdutor utilizado é representado na Figura 15, enquanto suas especificações técnicas são detalhadas na Tabela 6.



Figura 15. Transdutor de Pressão

Tabela 6. Especificações do transdutor de pressão

Fabricante	Acros
Modelo	TP-ST18
Alimentação	24V DC
Sinal de saída	4 - 20 mA
Faixa de operação	0 - 40 mca
Precisão	0,25% (fundo de escala)

#### 4.1.3.5 Transdutor de Vazão

Para a medição precisa da vazão, é usado um sensor eletromagnético. Esse dispositivo é projetado com base no princípio da indução eletromagnética, onde duas bobinas são estrategicamente posicionadas em lados opostos de um tubo por onde o fluido passa. Com a presença de um ímã permanente, o sensor é capaz de detectar e quantificar o fluxo do fluido através do tubo. A Figura 16 oferece uma representação visual deste transdutor de

vazão. Além disso, as especificações técnicas detalhadas deste transdutor estão disponíveis na Tabela 7.



Figura 16. Transdutor de Vazão

Tabela 7. Especificações do transdutor de vazão

Fabricante	INCONTROL
Modelo	VMS038
Alimentação	24V DC
Sinal de saída	4 - 20 mA
Faixa de operação	1,4 - 40,8 m <sup>3</sup> /h
Diâmetro interno	38 mm

## 4.2 Metodologia para Implementação de Sistemas de Controle

Os sistemas de Controle e Automação têm sido fundamentais para a melhoria contínua dos processos industriais ao longo dos anos. No entanto, implementá-los de maneira eficaz ainda pode ser desafiador, considerando a complexidade desses processos e a necessidade de uma abordagem precisa na implementação dos controladores. Portanto, adotar metodologias de projeto de controladores pode representar um avanço significativo para a indústria. Nesse contexto, a linha de trabalho explorada neste estudo propõe uma abordagem em quatro passos - coleta de dados, modelagem da planta, projeto do controlador e implementação na planta - como representado na Figura 17. Essa metodologia

visa simplificar e agilizar o processo de automação, proporcionando ganhos tangíveis de eficiência e competitividade para as empresas. A seguir, cada passo será detalhadamente abordado.



Figura 17. Metodologia Proposta

#### 4.2.1 Coleta de Dados

Nesta etapa, ocorre a aquisição de dados do processo através de sensores distribuídos na planta e sistemas de aquisição, como CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) e redes de comunicação. Esses dados são então armazenados no banco de dados do sistema supervisorio ou, em aplicações menores, em um sistema local. Para embasar o desenvolvimento do projeto, utilizamos dados históricos das variáveis que impactam o processo, os quais são extraídos do banco de dados. Garantir a qualidade desses dados é crucial para assegurar a precisão e confiabilidade do sistema de automação.

#### 4.2.2 Modelagem da Planta

Segundo AGUIRRE (2007), existem três abordagens principais para modelar um sistema real: modelagem em caixa branca, caixa preta e caixa cinza. Na modelagem em caixa branca, é essencial possuir um profundo conhecimento do sistema em estudo, assim como das leis físicas que o governam. Por outro lado, na modelagem em *caixa preta*, são aplicadas técnicas que incluem identificação de sistemas, Redes Neurais Artificiais e modelagem baseada em dados, eliminando a necessidade de um conhecimento detalhado do sistema. Entre essas metodologias, encontra-se a modelagem em *caixa cinza*, que apresenta características das duas abordagens mencionadas. Cada uma dessas técnicas oferece formas distintas de representar o comportamento dinâmico do sistema, com vantagens e aplicações específicas.

Dentre essas abordagens, a modelagem em *caixa preta* se destaca por várias vantagens, incluindo:

1. **Simplicidade:** Não é necessário um conhecimento detalhado das características internas do sistema.
2. **Flexibilidade:** A abordagem em *caixa preta* permite a aplicação de uma variedade de técnicas, como identificação de sistemas, Redes Neurais Artificiais e modelagem baseada em dados.
3. **Generalização:** Uma vez que a modelagem em *caixa preta* se baseia nas relações entre entradas e saídas do sistema, os modelos desenvolvidos podem ser mais facilmente generalizados e aplicados a diferentes contextos ou situações.

### 4.2.3 Projeto do Controlador

A partir do modelo da planta, 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.

### 4.2.4 Implementação na Planta

Após o desenvolvimento e teste do controlador, este é integrado ao sistema de automação da planta industrial.

Após a implementação inicial, uma bateria de testes é realizada para validar o desempenho do sistema automatizado. Isso pode incluir testes de funcionamento normal, testes de resposta a falhas, testes de segurança e outros testes relevantes para garantir a operação confiável e segura do sistema. Durante os testes, eventuais ajustes e otimizações podem ser feitos no controlador para garantir que ele atenda às necessidades específicas da planta e alcance os objetivos de desempenho estabelecidos.

# 5 Resultados

Nesta seção, serão apresentados os resultados do projeto do controlador Fuzzy, seguindo a metodologia descrita na seção anterior. Para uma melhor compreensão, esta seção foi dividida em duas subseções principais: Modelagem do Sistema e Implementação do Controle.

A subseção de Modelagem do Sistema aborda o processo desde a coleta de dados até a simulação do controle Fuzzy. Serão detalhados os passos seguidos para modelar o sistema, incluindo a seleção e preparação dos dados, a definição das variáveis de entrada e saída, e a aplicação dos algoritmos de controle Fuzzy para a construção do modelo. Já na subseção de Implementação do Controle, os resultados do controle na planta serão apresentados e discutidos.

## 5.1 Modelagem do Sistema

### 5.1.1 Coleta de Dados

Conforme a Figura 17, a coleta de dados é o primeiro de quatro passos. Ao analisar a composição da bancada, conforme mostrado na Figura 7, é possível identificar quatro pontos de medição: PT-2, CV-1, FT-1 e CV-2. Neste estudo específico, foram selecionados os pontos PT-2, CV-1 e a frequência do motor.

Os ensaios para aquisição de dados foram conduzidos com variações de frequência entre 30 e 55 Hz, com intervalo de 5 Hz. Esses valores representam os limites típicos usados em configurações de malha aberta. Para cada valor de frequência, o ângulo da válvula CV-1 foi ajustado para 0°, 30°, 50° e 70°, onde 0° indica o consumo máximo e 70° o consumo mínimo. Cada medição teve uma duração de dois minutos, com uma taxa de amostragem de 150 ms.

Após a coleta dos dados, 70% deles foram reservados para o treino e os restantes 30% foram dedicados à validação do modelo. A Figura 18 representa esses dados de treinamento.

### 5.1.2 Modelagem da Planta

O próximo passo envolve a modelagem da planta, para a qual foram empregadas redes neurais artificiais do tipo PMC. A arquitetura da rede neural consiste em uma camada de entrada com três nós, representando a amostra em tempo real da frequência, o ângulo da válvula e a pressão atrasada de uma amostra. Além disso, por meio de tentativa

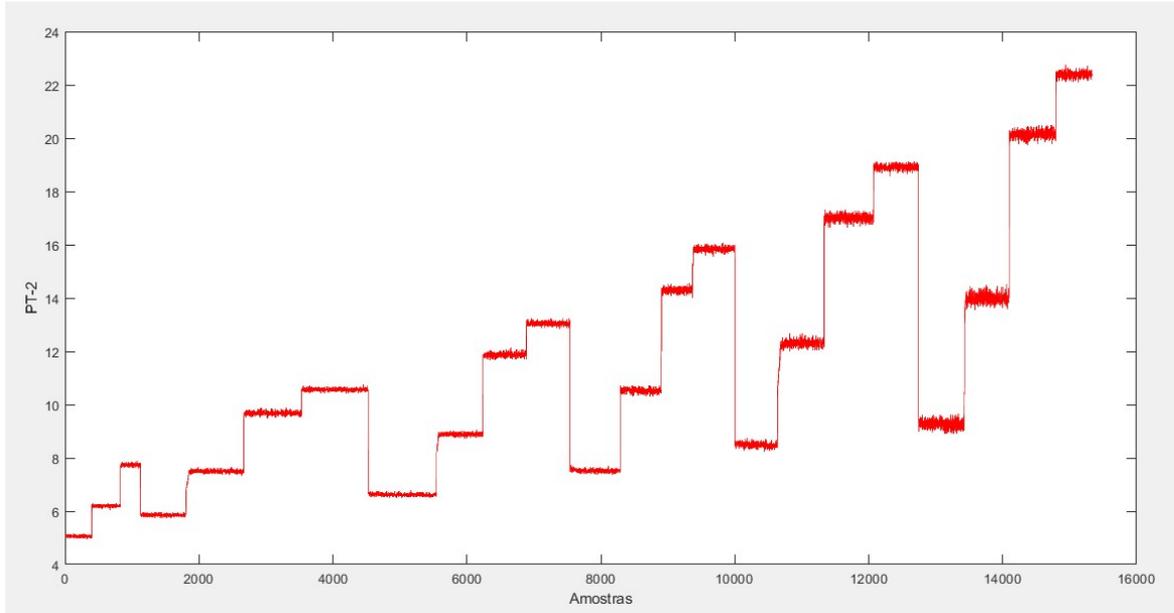


Figura 18. Dados para treino da RNA

e erro, foram utilizadas duas camadas ocultas, cada uma com 5 neurônios, e uma camada de saída, que representa a pressão em tempo real. Esta topologia está ilustrada na Figura 19.

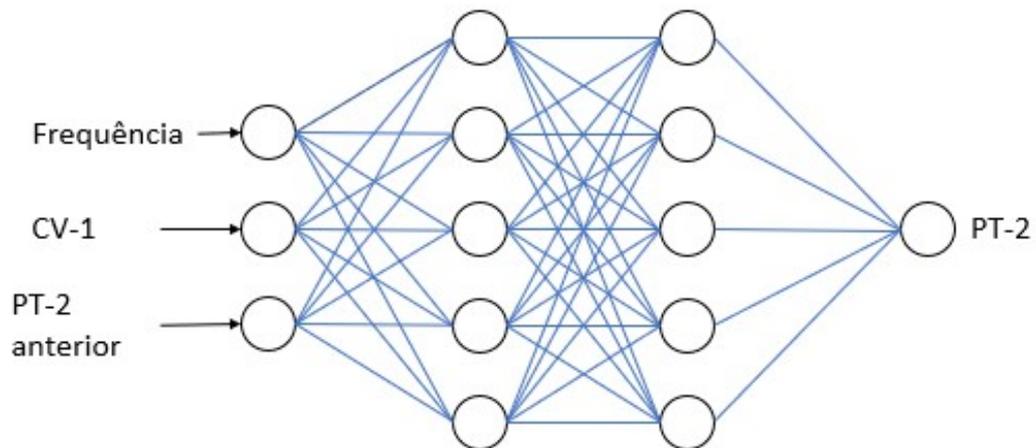


Figura 19. Topologia da RNA

Após o treinamento, o modelo foi testado utilizando os dados de validação. Os resultados estão ilustrados na Figura 20, onde a pressão real é representada em vermelho e a pressão prevista em azul. Para avaliar a eficácia do modelo, empregou-se a métrica MAPE, selecionada devido à sua expressão em termos percentuais e à sua facilidade de interpretação. O MAPE obtido para este modelo foi de 0,76%.

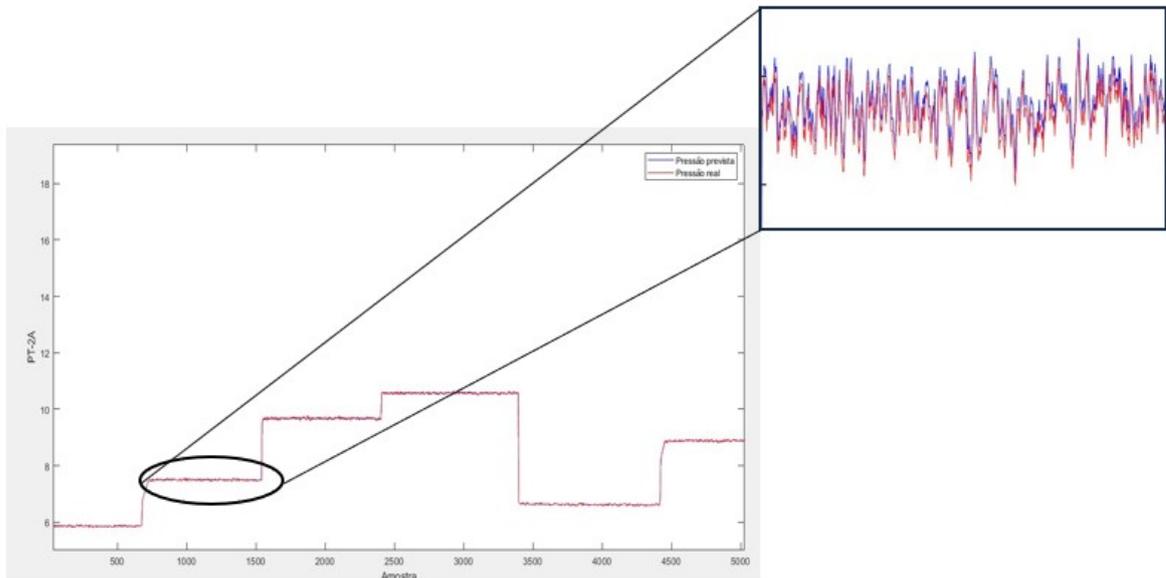


Figura 20. Validação da RNA

### 5.1.3 Projeto do Controlador

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 ( $\Delta f$ ), 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 21.

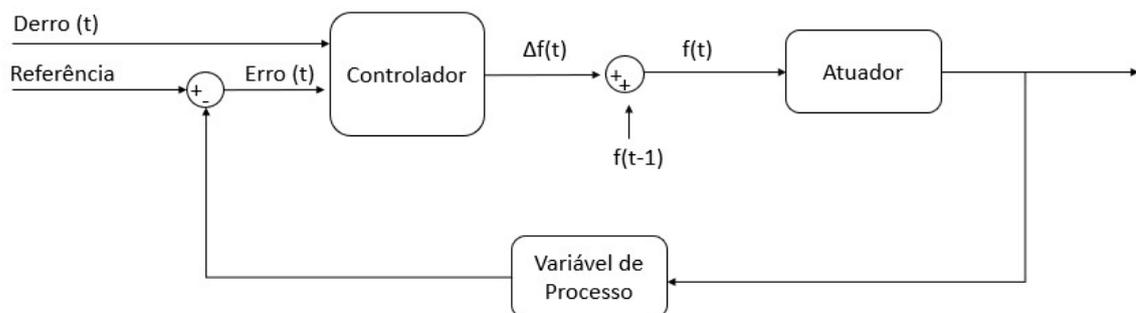


Figura 21. Controlador proposto

Projetar um controle Fuzzy demanda um profundo conhecimento das características da planta, pois é com base nessas informações que os conjuntos Fuzzy serão definidos. Nesse sentido, foram conduzidos diversos testes em malha aberta no modelo, visando compreender os efeitos do atuador no sistema em regime permanente. Essa análise permitiu a determinação dos conjuntos Fuzzy, os quais estão detalhados nas Tabelas 8, 9 e 10, além de serem visualizados na Figura 22. É relevante ressaltar que os valores de cada conjunto já foram ajustados durante a implementação na planta.

Nas tabelas a seguir, é possível observar que foram definidas duas funções de pertinência: a função trapezoidal (*trapfm*) e a função triangular (*trimf*). Enquanto a função trapezoidal atribui um alto valor de pertinência dentro de um intervalo específico e diminui gradualmente fora desse intervalo, a função triangular atribui um alto valor de pertinência em torno de um valor central, diminuindo linearmente para fora dessa faixa.

Neste trabalho, a função trapezoidal foi empregada nos conjuntos extremos de cada variável. Por exemplo, considerando o conjunto EPG, qualquer valor acima de 10 pertence integralmente a este conjunto. Por outro lado, para os demais conjuntos, optou-se pela aplicação da função triangular. Tomando o conjunto EZ como exemplo, o valor 0 é o elemento central, pertencendo totalmente ao conjunto Erro Zero. À medida que a variável varia para mais ou para menos, ela gradualmente deixa de pertencer a este conjunto de forma linear.

Essa escolha de funções representa um passo inicial e pode ser modificada para outras como as funções gaussiana, sigmoide e constante.

Tabela 8. Conjunto Erro.

<b>Símbolo</b>	<b>Nome</b>	<b>Função</b>	<b>Suporte</b>
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 9. Conjunto Derro.

<b>Símbolo</b>	<b>Nome</b>	<b>Função</b>	<b>Suporte</b>
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]
DEPG	Derivada do erro positivo grande	trapmf	[4 6 7 7]

Tabela 10. Conjunto  $\Delta f$ .

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]

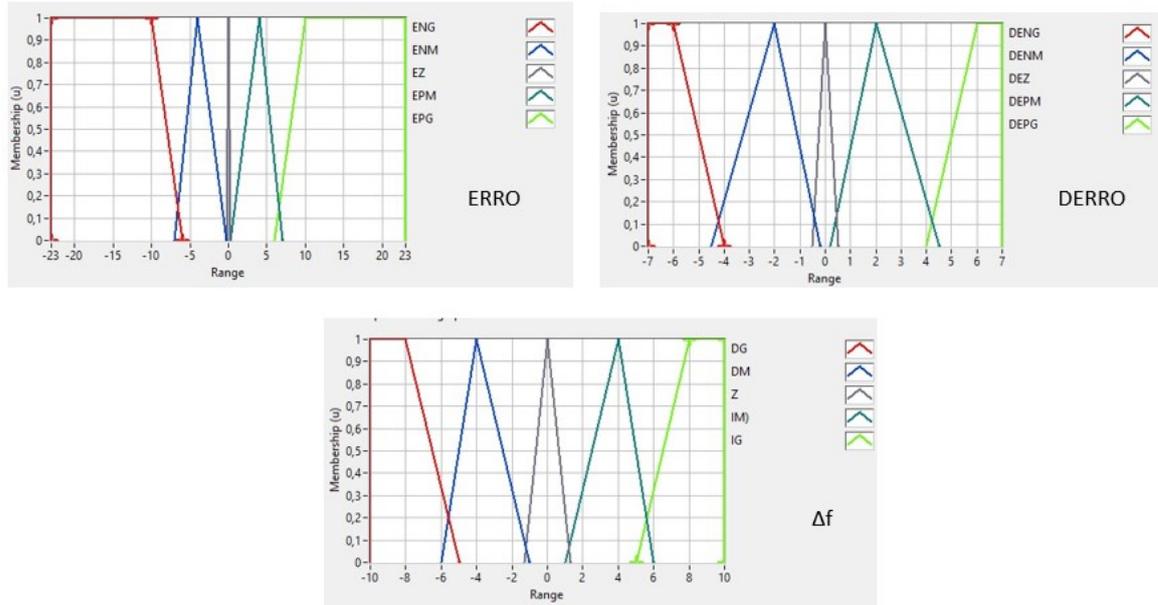


Figura 22. Conjuntos

Na Figura 23, 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.

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

Figura 23. Conjunto de Regras

Por fim, o controle Fuzzy foi simulado ao fechar a malha com o modelo do sistema. Na Figura 24, ilustra-se a pressão no transdutor PT-2, o valor de referência e o comportamento da frequência. Nesta simulação, a válvula CV-1 foi fechada em 30° e a *set point* foi variado com os valores 6, 10, 15, 12 e 7 mca. Conforme evidenciado na Figura 24, a

pressão (representada pela linha vermelha) permaneceu próxima ao *set point* (linha azul). Além dessas variáveis, também é possível observar o comportamento da frequência em resposta às variações do *set point*.

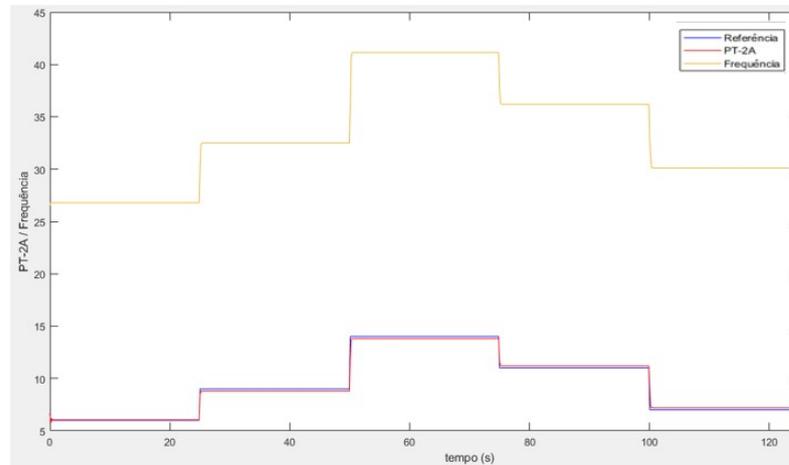


Figura 24. Resultado da simulação do controle Fuzzy

## 5.2 Implementação

Nesta seção, serão apresentados os resultados da implementação do controle Fuzzy na planta para o controle de pressão no transdutor PT-2. A análise dos efeitos do controlador foi conduzida em três cenários distintos, conforme descrito abaixo.

### Cenário I: Teste de Efetividade

Neste cenário, o objetivo foi avaliar a capacidade do controlador Fuzzy em manter a pressão do sistema dentro dos limites desejados diante de diferentes condições. Para isso, foram realizados testes nos quais variou-se tanto o valor de referência da pressão quanto o ângulo da válvula. Essas variações simulam situações práticas em que o sistema pode enfrentar perturbações, como mudanças na demanda ou eventos inesperados. A análise desses resultados permitirá determinar a robustez e a eficácia do controlador em lidar com tais cenários.

### Cenário II: Eficiência Energética

Neste cenário, o foco foi na análise do impacto do controle Fuzzy na eficiência energética do sistema. Para isso, foram efetuadas manobras hidráulicas variando o ângulo da válvula ao longo do experimento para representar diferentes padrões de consumo. Com essas variações, foi possível avaliar como o controlador influencia os custos energéticos, comparando a energia consumida com e sem a aplicação do controle Fuzzy.

### Cenário III: Comparação entre Controles

Neste cenário, realizou-se uma comparação entre duas abordagens de controle Fuzzy: inferência do tipo Mandani e Sugeno. Ambas as técnicas foram testadas variando tanto a pressão quanto o ângulo da válvula. O objetivo é determinar as vantagens e desvantagens de cada método em termos de desempenho e precisão. Essa comparação é importante para orientar a escolha da técnica mais adequada para as necessidades específicas do sistema em questão, considerando aspectos como tempo de resposta, capacidade de adaptação e facilidade de implementação.

### 5.2.1 Cenário I

Para avaliar o desempenho do controlador Fuzzy, diversas situações foram simuladas, variando tanto o *set point* quanto o ângulo da válvula, conforme descrito abaixo:

- Para um *set point* de 7,5 mca, os ângulos da válvula foram ajustados para 0°, 30°, 50° e 70°.
- Para um *set point* de 15 mca, os ângulos da válvula foram ajustados para 70°, 50° e 30°.
- Para um *set point* de 10 mca, os ângulos da válvula foram ajustados para 30°, 50° e 70°.

Como demonstrado na Figura 25, para uma melhor análise do impacto do controlador, o gráfico foi subdividido em regiões, delimitadas por cada mudança de ângulo, numeradas de 1 a 10. Além disso, as zonas de transição dos ângulos foram identificadas com seus respectivos valores angulares. O propósito dessa segmentação é avaliar o MAPE de cada região, bem como os tempos de transição ( $T_t$ ) e de assentamento ( $T_a$ ). É relevante ressaltar que  $T_t$  é o período que a válvula leva para se mover de uma posição inicial para uma posição desejada, como de 0° para 30°, já  $T_a$  é o tempo necessário para o sistema se estabilizar após a transição da válvula.

Com base na Tabela 11, o controle Fuzzy demonstrou um desempenho satisfatório, com o maior MAPE em regime permanente atingindo apenas 1,7312%. Durante as transições do ângulo da válvula, o controlador manteve o MAPE abaixo de 3,1047%. Além disso, os tempos de assentamento para as mudanças de *set point* de 7,5 mca para 15 mca e de 15 mca para 10 mca foram de apenas 2,12 e 2,23 segundos, respectivamente. Dessa maneira, observa-se que o tempo de assentamento foi maior para a segunda transição mesmo com uma variação de *set point* menor. Esse efeito está associado com a configuração da lógica Fuzzy para o *Erro* negativo, onde foi observado um comportamento semelhante em situações análogas.

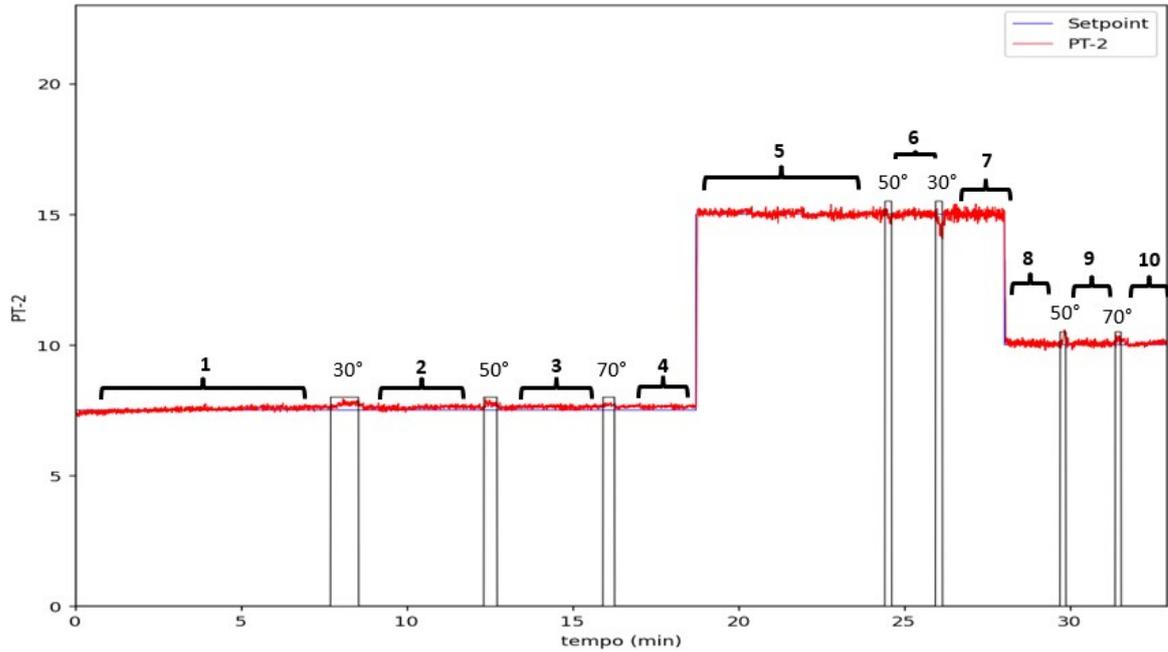


Figura 25. Cenário I

Tabela 11. Métricas para análise de desempenho do controlador

Região	MAPE (%)	$T_t$ (s)	$T_a$ (s)
1	0.9823	-	-
30°	2.8538	29.2	5.2
2	1.3811	-	-
50°	3.1047	18.6	2.9
3	1.5772	-	-
70°	2.5249	19.3	2.3
4	1.7312	-	-
5	0.5441	-	-
50°	0.9016	16.6	0.9
6	0.5175	-	-
30°	2.6564	19.6	6.6
7	0.7232	-	-
8	0.8035	-	-
50°	2.2245	17.3	4.4
9	0.7396	-	-
70°	1.9637	19.1	0.4
10	0.7720	-	-

## 5.2.2 Cenário II

Neste experimento, foram realizados dois testes com o objetivo de observar o impacto do controle Fuzzy na eficiência energética. No primeiro teste, o sistema foi operado em malha aberta, onde uma frequência fixa de 45 Hz foi estabelecida. Durante este teste, foram simulados diferentes padrões de consumo ao variar o ângulo da válvula CV-1 em

quatro níveis distintos:  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$  e  $70^\circ$ . Já no segundo teste, a malha de controle foi fechada, com um *set point* definido em 7,8 mca, o que equivale à pressão obtida a 45 Hz em malha aberta. Novamente, variou-se o ângulo da válvula CV-1 nos mesmos quatro valores utilizados no teste em malha aberta.

Na Figura 26, 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 elétrico desnecessário. Por outro lado, na Figura 27, 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.

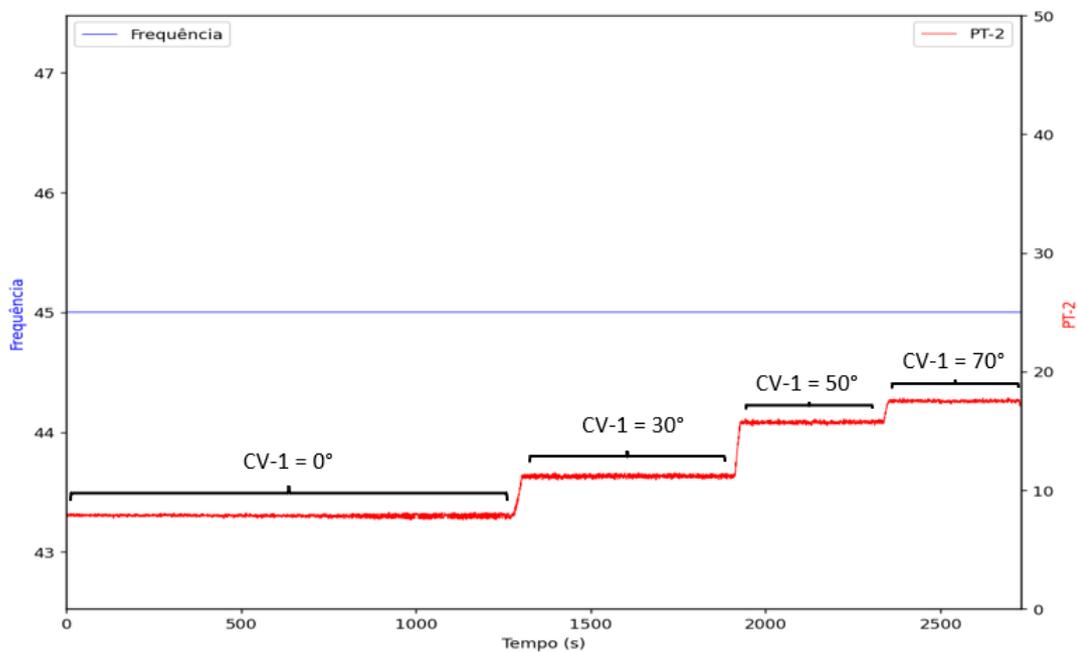


Figura 26. Sistema em malha aberta

A corrente, potência e energia consumidas em cada ensaio estão detalhadas nas Tabelas 12 e 13. 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  $30^\circ$ , 17,07% para  $50^\circ$  e 15,28% para  $70^\circ$ , 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 12 e 13, 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.

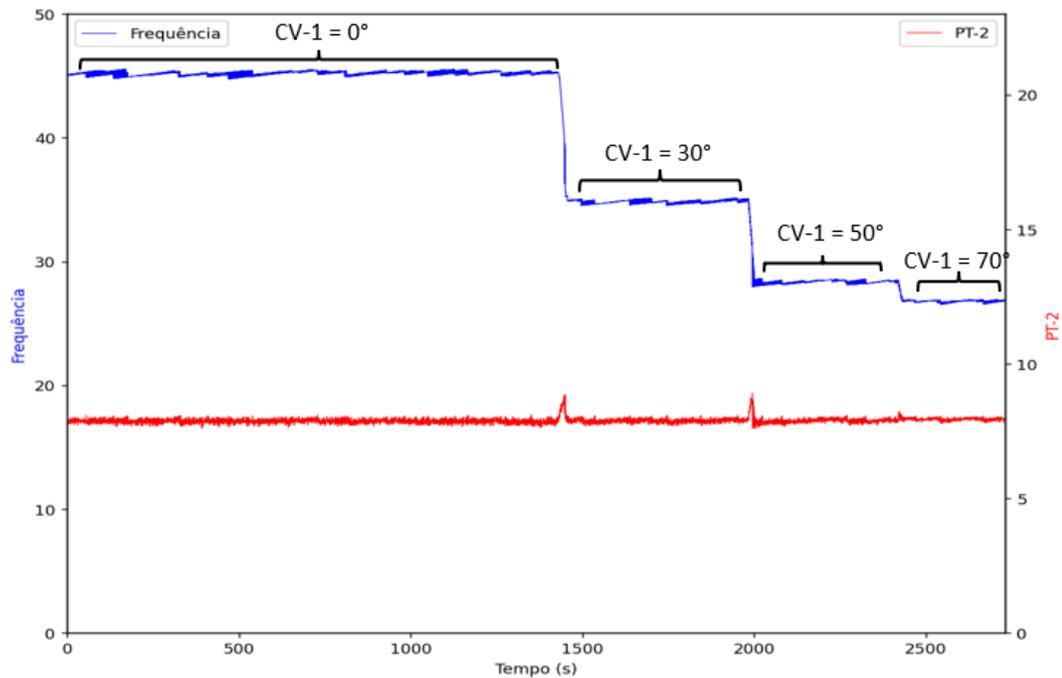


Figura 27. Sistema em malha fechada

Tabela 12. 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 13. 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	0.2233
10	50	2.72	1231	0.2052
10	70	2.66	1204	0.2007

### 5.2.3 Cenário III

Este experimento visa comparar o desempenho de dois tipos de controle Fuzzy: Mandani e Sugeno. Para avaliar cada método, foram selecionados quatro valores de referência para a pressão: 5,5 mca, 13 mca, 9 mca e 5,5 mca. O ângulo da válvula foi mantido em 30°, representando um consumo médio.

As métricas escolhidas para análise foram o MAPE, IAE, ITAE, tempo de subida ( $T_s$ ), tempo de assentamento e sobressinal. O MAPE, IAE e ITAE foram calculados durante o regime permanente de cada valor de referência e também para o cenário global, ou seja,

ao longo de todo o experimento.

Para facilitar a interpretação, o intervalo de tempo de cada referência foi dividido em regiões, conforme descrito abaixo:

- Região 1: corresponde à referência de 5,5 mca (início do experimento);
- Região 2: referente a 13 mca;
- Região 3: referente a 9 mca;
- Região 4: associada a 5,5 mca (término do experimento).

As Figuras 28 e 29 apresentam os resultados dos controles Mandani e Sugeno, respectivamente.

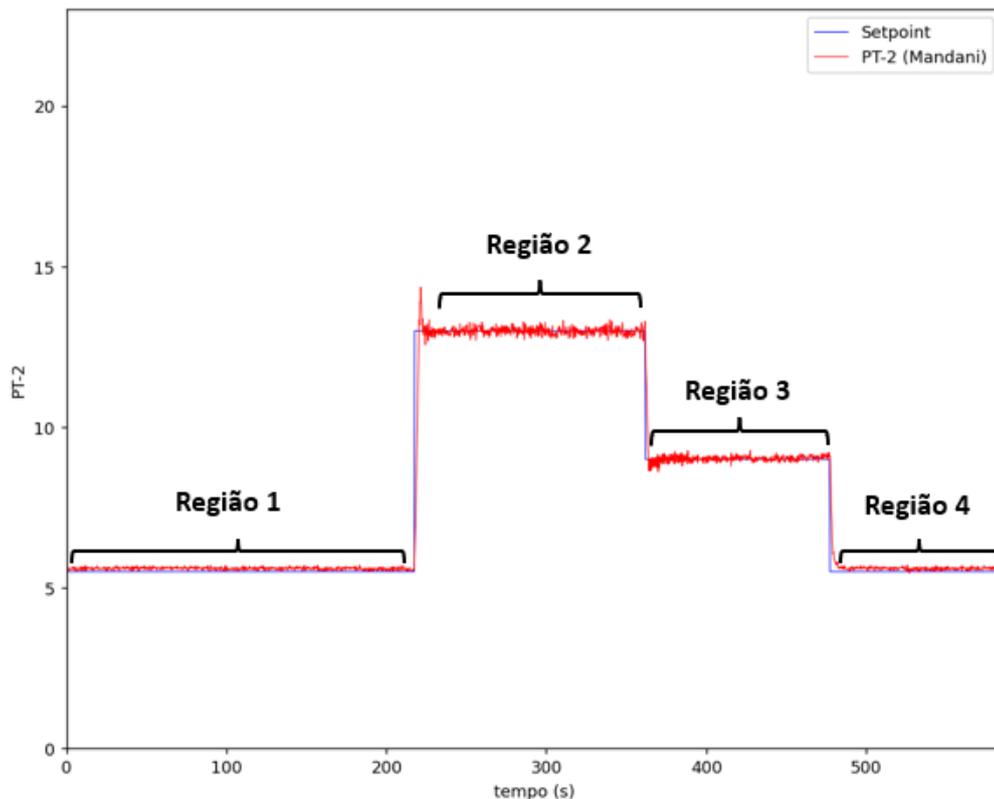


Figura 28. Resposta do controlador do tipo Mandani

Nas Tabelas 14 e 15, são apresentados o MAPE, IAE e ITAE durante o regime permanente para cada região, além do tempo de subida ( $T_s$ ), tempo de assentamento ( $T_a$ ) e sobressinal durante as transições entre as referências. Já na Tabela 16, são mostrados o MAPE, IAE e ITAE para todo o experimento.

Ao analisar os dados das Tabelas 14 e 15 em regime permanente, observamos que o controle com inferência do tipo Mandani apresentou um desempenho superior nas regiões

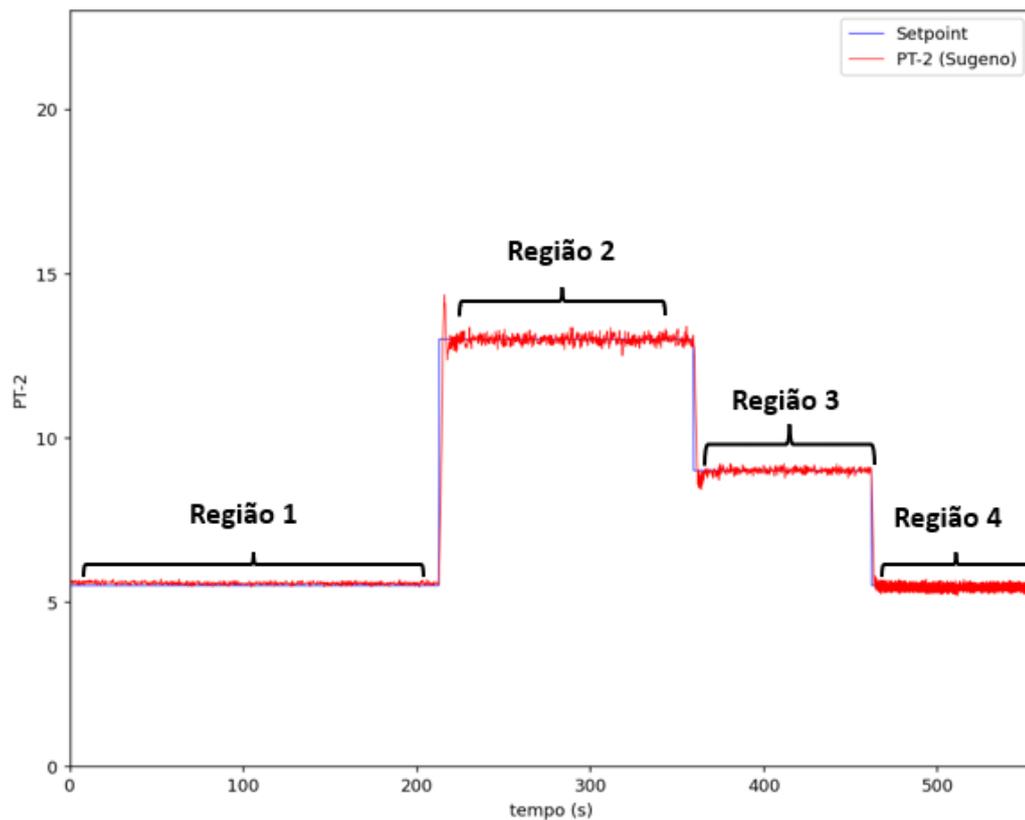


Figura 29. Resposta do controlador do tipo Sugeno

Tabela 14. Métricas do Controle Fuzzy Mandani

Região	MAPE (%)	IAE	ITAE	$T_t$ (s)	$T_a$ (s)	Sobrevalor (%)
1	1.7619	21.61	2225	-	-	-
2	0.7546	13.56	3870	1.68	3.55	10.4
3	0.7771	7.65	3231	1.50	6.03	4.1
4	1.7815	9.92	5271	1.80	5.81	0

Tabela 15. Métricas do Controle Fuzzy Sugeno

Região	MAPE (%)	IAE	ITAE	$T_t$ (s)	$T_a$ (s)	Sobrevalor (%)
1	1.3015	15.40	1537	-	-	-
2	0.8304	14.91	4324	1.60	3.90	10.4
3	0.7344	6.34	2612	1.2	4.6	6.4
4	2.7656	13.28	6749	1.60	2.0	0

2 e 4, exibindo melhores valores de MAPE, IAE e ITAE. Por outro lado, nas regiões 1 e 3, o controle com inferência Sugeno demonstrou um desempenho superior. Quanto ao tempo de subida, o controle do tipo Sugeno registrou valores menores ao longo do experimento.

Em uma análise geral, conforme demonstrado na Tabela 16, o controle com inferência Sugeno mostrou um desempenho superior, com um MAPE aproximadamente 30% menor que o do Mandani, e os valores de IAE e ITAE corroboram essa observação.

Tabela 16. Metricas para Inferência Sugeno e Mandani

<b>Tipo</b>	<b>MAPE (%)</b>	<b>IAE</b>	<b>ITAE</b>
Mandani	2.4285	97.64	27684
Sugeno	1.6958	69.69	21060

## 6 Conclusões

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um controle de pressão baseado em lógica Fuzzy para uma bancada que simula um sistema de abastecimento de água para a zona baixa. O projeto segue uma metodologia estruturada em quatro etapas: coleta de dados, modelagem do sistema, projeto do controlador e implementação no sistema real. Para validar o controle, foram definidos três cenários: teste de efetividade, análise de eficiência energética e comparação entre os métodos de inferência Mandani e Sugeno.

No teste de efetividade, o controle Fuzzy demonstrou uma resposta satisfatória, com um MAPE máximo de 1,7312% em regime permanente. Durante a variação do ângulo da válvula CV-1, o controle respondeu rapidamente, mantendo o MAPE próximo aos valores em regime permanente.

Na análise da eficiência energética, o controle possibilitou uma redução média de 15,51% em relação à frequência fixa de 45 Hz em malha aberta, representando uma solução para melhorar o consumo energético no sistema de abastecimento de água.

No Cenário III, a comparação entre os métodos de inferência Mandani e Sugeno revelou resultados semelhantes em partes individuais do experimento. No entanto, de maneira geral, o controle com inferência Sugeno obteve um desempenho superior para esta planta, com um MAPE aproximadamente 30% menor que o controle com inferência Mandani.

A adoção dessa metodologia estruturada em quatro etapas proporcionou o desenvolvimento eficiente do projeto, sem interferir em sua concepção original, resultando em economia de tempo e custos. Além disso, essa abordagem pode ser facilmente adaptada para outros tipos de sistemas e controles.

Por fim, a implementação do controle de pressão foi bem-sucedida, alcançando todos os objetivos estabelecidos. No entanto, ainda há oportunidades para avanços adicionais nesta área. Trabalhos futuros podem explorar a automação completa do processo, permitindo uma implementação mais ágil e eficiente da metodologia proposta. Além disso, há espaço para uma investigação mais aprofundada sobre o uso da inferência do tipo Sugeno no controle Fuzzy, buscando otimizar ainda mais o desempenho do sistema.

## Referências

- AGUIRRE, L. A. *Introdução à Identificação de Sistemas–Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. [S.l.]: Editora UFMG, 2007. Citado na página 36.
- ARAÚJO, J. V. Santos de et al. Fuzzy control of pressure in a water supply network based on neural network system modeling and iot measurements. *Sensors*, v. 22, n. 23, 2022. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9130>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 17.
- BEZERRA, S. et al. Energy savings in pumping systems: Application of a fuzzy system. *Ciência & Engenharia*, v. 24, n. 1, p. 71–78, 2015. Citado na página 14.
- CAVALCANTI, D. B. et al. Modelagem de um sistema de bombeamento para o controle de vazão por conversor de frequência baseado na teoria de identificação de sistemas. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1, n. 1. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 21.
- CHAIB, L.; CHOUCHA, A.; ARIF, S. Optimal design and tuning of novel fractional order pid power system stabilizer using a new metaheuristic bat algorithm. *Ain Shams Engineering Journal*, Elsevier, v. 8, n. 2, p. 113–125, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- FILHO, E. G. d. B. et al. Sistema inteligente para o controle de pressão de redes de distribuição de água abastecidas por bombas associadas em paralelo. Universidade Federal da Paraíba, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 18.
- FLORES, T. K. S. et al. Adaptive pressure control system based on the maximum correntropy criterion. *Sensors*, MDPI, v. 21, n. 15, p. 5156, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 15, 17 e 23.
- JACKSON, E. 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*, Elsevier, v. 119, p. 32–48, 2019. Citado na página 27.
- MONTEIRO, A. C. L. et al. Aplicação de um controlador pid para redução do consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 18.
- MOREIRA, H. A. et al. Controle autorregressivo para estabilização da pressão em sistemas de bombeamento com demanda variável. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 2, n. 1. Citado na página 17.
- SCHOEN, M. P. *Introduction to Intelligent Systems, Control, and Machine Learning using MATLAB*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. *Controle e modelagem fuzzy*. [S.l.]: Editora Blucher, 2007. Citado na página 23.

SOBRINHO, R. A.; BORJA, P. C. Management of water and energy losses in embasa water supply systems: A study of factors involved in rms. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 21, p. 783–795, 2016. Citado na página 14.

TRATABRASIL.ORG.BR. *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*. 2022. Disponível em: <<https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/09/RelatorioCompleto.pdf>>. Citado na página 14.

TSUTIYA, M. T. Abastecimento de água. 2004. Citado na página 20.

WWW.GOV.BR. *Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto*. 2021. Disponível em: <[https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/ArquivosPDF/Snis/AGUA\\_E\\_ESGOTO/](https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/ArquivosPDF/Snis/AGUA_E_ESGOTO/)>