

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DO TRIÂNGULO MINEIRO – CAMPUS PARACATU**

**JOÃO VICTOR CIRINO AGUIAR**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS CONTROLADORES FUZZY E  
PID APLICADOS AO CONTROLE DE NÍVEL DA PLANTA DIDÁTICA  
HART DO IFTM - CAMPUS PARACATU.**

**PARACATU - MG**

**2024**

**JOÃO VICTOR CIRINO AGUIAR**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS CONTROLADORES FUZZY E PID  
APLICADOS AO CONTROLE DE NÍVEL DA PLANTA DIDÁTICA HART DO IFTM -  
CAMPUS PARACATU.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro, Campus Paracatu, como requisito parcial para conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Silas Martins Sousa

**PARACATU - MG  
2024**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas do IFTM

A282e	<p>Aguiar, João Victor Cirino</p> <p>Estudo comparativo entre os controladores Fuzzy e PID aplicados ao controle de nível da planta didática HART do IFTM - Campus Paracatu / João Victor Cirino Aguiar. -- Paracatu, 2024.</p> <p>52 f. : il.</p> <p>Orientador: Silas Martins Sousa.</p> <p>Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro – Campus Paracatu.</p> <p>1. Engenharia elétrica. 2. Sistemas de controle inteligente. 3. Controladores Fuzzy. 4. Controladores PID. I. Sousa, Silas Martins. II. Título.</p> <p>CDD 621.8</p>
-------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

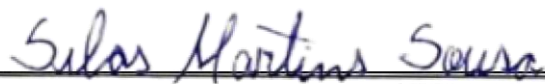
## TERMO DE APROVAÇÃO

**JOÃO VICTOR CIRINO AGUIAR**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS CONTROLADORES FUZZY E PID  
APLICADOS AO CONTROLE DE NÍVEL DA PLANTA DIDÁTICA HART DO IFTM -  
CAMPUS PARACATU.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro, Campus Paracatu, como exigência parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Elétrica, sob a orientação do Prof. Me. Silas Martins Sousa.

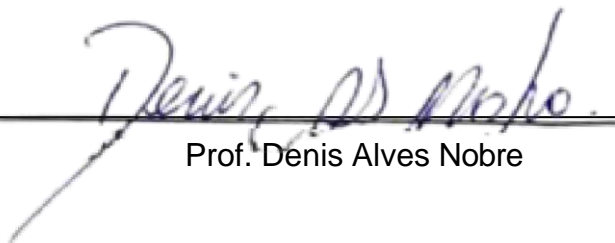
Aprovado em 06 de setembro de 2024



Prof. Me. Silas Martins Sousa



Prof. Me. Getúlio Albernaz Lobo



Prof. Denis Alves Nobre

**PARACATU - MG  
2024**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, Alexandrino e Katia Maria, cuja amorosa orientação e apoio incondicional foram fundamentais para a realização deste projeto, e aos meus irmãos Pedro Luca e Carlos Eduardo, que pude partilhar de toda essa trajetória nos melhores e piores dias. Gostaria de dedicar esse trabalho também a todos os amigos, colegas e professores que estiveram ao meu lado durante toda essa trajetória. A todos esses o meu Muito Obrigado

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar expresso minha gratidão a Deus, pois ele tem me sustentado até aqui, e diariamente me renova com força e coragem, para conseguir alcançar os meus objetivos. Gostaria também de expressar minha eterna gratidão a minha família, se estou aqui hoje concluindo esta formação, é graças a eles, que nunca soltaram a minha mão. Foram eles que me deram forças quando mais precisei, foram eles que me incentivaram quando tudo parecia difícil, foram eles que me deram todo o suporte até aqui. Gostaria de agradecer de coração a pessoa que compartilhou desse mix de sentimentos que é se formar em Engenharia Elétrica, que me arrancou risadas nos piores dias, que me levou e buscou no IFTM inúmeras vezes, que me apoiou e me deu suporte até aqui, principalmente nessa reta final, enfim gratidão M.G.G.G. Gostaria de agradecer também a todo o corpo Docente que durante todo esse período de aprendizado no IFTM - Campus Paracatu, me proporcionaram não só ensinamentos técnicos da área de formação, mas também agregaram na minha formação pessoal como um cidadão. Em especial, agradeço ao Professor Mestre Silas Martins Sousa, que me orientou e ensinou durante toda a execução do projeto, que pode agregar em minha vida com seu vasto conhecimento em diversas áreas, e me incentivou até o fim, principalmente nos dias difíceis. Gostaria de agradecer aos amigos que estiveram ao meu lado, e de diversas formas puderam me ajudar durante essa trajetória, também aos amigos que fiz durante o curso, que nas lutas diárias compartilharam um pouco das correrias, alegrias e tristezas (Não só de alegrias vive um estudante de Engenharia Elétrica), que passamos durante esse processo de formação. Por fim agradeço a todos os envolvidos que fazem parte dessa grande instituição que é o Instituto Federal do Triângulo Mineiro – Campus Paracatu, que de alguma forma agregaram em minha vida e em minha formação, estarão sempre marcados em minha vida.

## EPÍGRAFE

*“A engenharia é a arte de resolver problemas e criar soluções que não só atendem às necessidades atuais, mas também antecipam o futuro.”*

***Dr. David W. T. Hine***

## RESUMO

Para atender às especificações de processos industriais, são utilizados sistemas de controle. Os sistemas atuais constam, em sua maioria, com o controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), que é ideal para sistemas lineares. Quando o sistema a ser controlado possui características não lineares, este tipo de controlador não se mostra eficiente para toda a faixa de atuação. Desta forma, este trabalho avalia e compara o desempenho dos controladores PID e FUZZY aplicados ao controle de nível de uma planta didática do IFTM - Campus Paracatu. O estudo focou na análise de critérios como precisão, estabilidade, robustez e facilidade de implementação dos dois métodos. O controlador PID, conhecido por sua simplicidade e eficiência em sistemas lineares, mostrou-se eficaz na manutenção do nível próximo ao *setpoint*, com boas características de estabilidade e resposta rápida. Por outro lado, o controlador FUZZY, que é adequado para lidar com incertezas e sistemas não-lineares, enfrentou dificuldades para manter a estabilidade e apresentou oscilações significativas, mesmo após ajustes nos parâmetros e no intervalo de tempo das atualizações. Apesar das vantagens do FUZZY em situações complexas, a análise mostrou que o PID se saiu melhor para a planta didática em condições normais de operação. O estudo sugere que o controlador PID é mais adequado para sistemas lineares e bem modelados, enquanto o FUZZY pode ser uma alternativa útil para sistemas com características variáveis e não-lineares, desde que sejam feitas melhorias na sua calibração.

**Palavras-chave:** controle pid; controle fuzzy; controle de nível; plantas didáticas; sistemas lineares; sistemas não-lineares.



## **ABSTRACT**

To meet industrial process specifications, control systems are employed, with the PID controller being prevalent in current systems due to its suitability for linear systems. However, when the controlled system exhibits non-linear characteristics, this type of controller may not be efficient across its entire operational range. This study evaluates and compares the performance of PID and FUZZY controllers applied to the level control of a didactic plant at IFTM - Campus Paracatu. The focus of the study was on analyzing criteria such as accuracy, stability, robustness, and ease of implementation of both methods. The PID controller, known for its simplicity and efficiency in linear systems, proved effective in maintaining the level close to the setpoint, exhibiting good stability and quick response characteristics. In contrast, the FUZZY controller, designed to handle uncertainties and non-linear systems, struggled with stability and showed significant oscillations, even after adjustments to parameters and update intervals. Despite FUZZY's advantages in complex situations, the analysis indicated that the PID performed better for the didactic plant under normal operating conditions. The study suggests that the PID controller is more suitable for linear and well-modeled systems, while FUZZY may be a useful alternative for systems with varying and non-linear characteristics, provided that improvements in its calibration are made.

**Keywords:** pid control; fuzzy control; level control; didactic plants; linear systems; non-linear systems.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Planta de ensaios de malhas de controle PDH-ATK 1001 com comunicação HART e sensores SMAR, projetada pelo grupo AUTHOMATHIKA.	18
<b>Figura 2</b> - Foto do CLP GE Fanuc modelo VersaMax IC200CPUE05 existente no painel da planta didática do Laboratório do IFTM campus Paracatu .....	18
<b>Figura 3</b> - Exemplo de programação em linguagem de Diagrama Ladder (LAD).	25
<b>Figura 4</b> - Exemplo de implementação da linguagem de CLP Diagrama de Blocos Funcionais. ....	26
<b>Figura 5</b> - Variável linguística, Termos linguísticos e funções de pertinência.	27
<b>Figura 6</b> - Blocos do sistema do Controlador Fuzzy.....	27
<b>Figura 7</b> - Representação gráfica de: a) regras Fuzzy, expressões de inferência (Mamdani), b) Inferência Fuzzy pelo método de Mamdani. ....	29
<b>Figura 8</b> - Processo de Defuzzificação pelo centro de gravidade.....	29
<b>Figura 9</b> - Diagrama de Blocos de um Controlador PID em Malha Fechada para Controle de Temperatura.....	30
<b>Figura 10</b> - Representação da Ferramenta Matlab Fuzzy Logic Toolbox.....	32
<b>Figura 11</b> - Tela do supervisor desenvolvida através do Idusoft Web Studio	33
<b>Figura 12</b> - Diagrama de funcionamento do sistema desenvolvido neste projeto, mostrando a planta didática, PLC e o computador para programação do bloco Fuzzy.....	34
<b>Figura 13</b> - Representação gráfica das funções de pertinências Triangular e Singletons.....	35
<b>Figura 14</b> - Regras para a tomada de decisão.....	36
<b>Figura 15</b> - Adaptações feita para uma função de pertinência próxima de um Singleton.....	36

<b>Figura 16</b> - Diagrama de blocos do controlador Fuzzy Incremental PI.....	38
<b>Figura 17</b> - Simulação no Matlab pelo Fuzzy Logic Toolbox.....	41
<b>Figura 18</b> - Tela do Supervisório com o Setpoint desejado de 30.....	42
<b>Figura 19</b> - Controle Fuzzy para Setpoint de 50, com um range de ganho de -50 a 50 (Ganho = 1). .....	43
<b>Figura 20</b> - Controle Fuzzy para Setpoint de 70, com um range de ganho de -50 a 50 (Ganho = 1). .....	43
<b>Figura 21</b> - Controle Fuzzy para Setpoint de 50, com um range de ganho de -100 a 100 (Ganho = 2). .....	44
<b>Figura 22</b> - Controle Fuzzy para Setpoint de 80, com um range de ganho de -25 a 25 (Ganho = 0,5). .....	45
<b>Figura 23</b> - Controle PID para Setpoint de 80.....	46

## LISTA DE QUADROS

<b>QUADRO 1</b> - REGRAS DE UM SISTEMA DE TOMADA DE DECISÃO DE LAVAGEM DE ROUPA (SILVA, 2011)	28
-----------------------------------------------------------------------------------------------	----

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CLP - Controlador Lógico Programável

PLC - *Programmable Logic Controller* (Controlador Lógico Programável)

IFTM - Instituto Federal do Triângulo Mineiro

PID - Proporcional - Integral – Derivativo

LAD - Ladder

FBD - Blocos Funcionais

ST- Texto Estruturado

IL - Lista de Instruções

(T-S) - Takagi-Sugeno

MPPT - *Maximum Power Point Tracker* (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)

SCADA - *Supervisory Control And Data Acquisition* (Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	PROBLEMA.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	OBJETIVOS .....	20
1.3.1	OBJETIVO GERAL .....	20
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>22</b>
2.1	CONTROLE DE SISTEMAS .....	22
2.2	PLANTA DIDÁTICA .....	22
2.3	PLC GE FANUC – VERSAMAX IE200CPUE05.....	23
2.4	LÓGICA DE CONTROLE FUZZY E PID .....	25
2.5	FERRAMENTA PARA SIMULAÇÃO – MATLAB FUZZY LOGIC TOOLBOX.....	31
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia industrial avançou com o passar dos anos, visando atender aos processos produtivos automatizados. Diante disso, sabe-se que os acionamentos elétricos dos maquinários industriais eram feitos, primordialmente, por meio de relés, dispositivos eletromecânicos formados por uma bobina e um bloco de contatos (Petruszella, 2010). Entretanto por mais úteis que fossem esses relés, detinham alguns problemas, principalmente no que diz respeito ao espaço físico ocupado por eles.

Diante disso, com a evolução da tecnologia na década de 1970, surgiu o microprocessador, o qual deu origem ao Controlador Lógico Programável (CLP) ou *Programmable Logic Controller (PLC)*, revolucionando o controle de processos industriais (Bolton, 2015). Silva e Menezes (2008) descrevem o dispositivo como um circuito integrado projetado para executar instruções fornecidas por um programador. Isso possibilitou aos pesquisadores da indústria automobilística o desenvolvimento de um equipamento que combinava as características do microprocessador com a versatilidade dos relés, tudo compactado em um único invólucro e possuírem a característica de serem reprogramados.

O CLP, cuja principal justificativa é substituir os sistemas controlados por relés, é visto como o "cérebro" de um sistema de automação industrial e é comparado, de maneira análoga, a um computador de processo (Gusarova; Shilkina, 2019). Logo o uso desta ferramenta é essencial para a automatização de processos industriais.

Para que o sistema de automação realize um controle preciso em processos que requerem ajustes constantes, utiliza-se o CLP para implementar uma lógica de controle. Dentre essas lógicas de controle existentes, o mais comumente utilizado e conhecido é o PID, que se refere às ações de controle Proporcional-Integral-Derivativo, é amplamente empregado em sistemas industriais ao redor do mundo (Sheng Qiang; Gao; Xianyi Zhuang, 2002).

A vasta aplicação do controle PID está atrelada aos benefícios em sistemas lineares, que incluem sua simplicidade, facilidade de implementação e capacidade de fornecer um controle robusto para uma ampla gama de processos industriais.

Dessa forma, como fora destacado por Dorf e Bishop (2011), a estrutura simples do PID facilita sua aplicação em diversas áreas da engenharia, desde o controle de temperatura até a regulação de velocidade em motores elétricos.

Na prática, entretanto, existem muitos processos não lineares, o que significa que as variáveis de entrada e saída de um controle PID não possuem a proporcionalidade mencionada. Mesmo assim, o sistema de controle PID ainda é frequentemente utilizado, apesar de não ser ideal para esses casos de não linearidade em processos, principalmente devido à falta de opções de controle alternativas no CLP utilizado.

Diante disso, tratando-se de um cenário em que exista um sistema não linear, surge a aplicação da Lógica FUZZY. Esta lógica é fundamentada na teoria dos conjuntos Fuzzy, que permite que as variáveis assumam valores graduais ao invés de serem estritamente verdadeiras ou falsas (Mendel, 2017). Essa característica possibilita que o controlador Fuzzy tome decisões com base em regras linguísticas, como "se a temperatura é alta, então reduza a potência do aquecedor moderadamente".

A lógica Fuzzy oferece uma solução eficaz para o controle de sistemas não lineares, onde o controle PID tradicional pode não fornecer uma resposta adequada para todo o intervalo de variação. Sua capacidade de lidar com incertezas e imprecisões, juntamente com a flexibilidade de ajuste, a torna uma ferramenta valiosa na automação industrial moderna.

Portanto, o controle de processos é um aspecto importante da automação industrial, assegurando que as operações sejam realizadas de forma eficiente e precisa. Dessa maneira, dispondo-se de uma planta didática de controle, entre eles controle de nível, no Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) campus Paracatu, possibilita então um ambiente ideal para explorar e comparar diferentes técnicas de controle. Esta pesquisa foca na comparação entre dois métodos amplamente utilizados: o controlador PID e o controlador FUZZY.

Compreender as diferenças entre esses dois tipos de controladores, permitirá uma escolha e aplicação mais adequada em diferentes cenários industriais, promovendo a otimização dos processos e a inovação tecnológica na



área de automação.

## 1.1 PROBLEMA

O controle de processos é vital na engenharia, especialmente para sistemas que exigem alta precisão e estabilidade, como o controle de nível de líquidos em tanques. A eficácia dos controladores é crucial para garantir a estabilidade do sistema e a qualidade do processo. No contexto da planta didática do IFTM Paracatu, que forma e aperfeiçoa futuros engenheiros, a escolha do controlador mais adequado para o controle de nível é de grande importância nesse contexto de adquirir conhecimento e ver na prática através de comparações a utilização de ambas as lógicas de controle.

Os controladores PID são amplamente usados devido à sua simplicidade, robustez e eficiência em várias aplicações industriais. No entanto, os controladores FUZZY, baseados na lógica Fuzzy, destacam-se por lidar bem com sistemas não-lineares e incertos, oferecendo uma alternativa interessante ao PID tradicional.

Diante disso, é necessário investigar qual controlador, PID ou FUZZY, apresenta melhor desempenho no controle de nível da planta didática do IFTM Paracatu. Essa investigação é fundamental para compreender as vantagens e limitações de cada abordagem, auxiliando na escolha do controlador mais adequado para aplicações industriais.

Por fim, a hipótese central deste projeto de pesquisa é de que o controlador FUZZY proporcionará um desempenho superior ao controlador PID no controle de nível da planta didática do IFTM Paracatu, devido à sua melhor capacidade de lidar com sistemas não-lineares e incertos.

Espera-se que o controlador FUZZY ofereça maior precisão, estabilidade e um tempo de resposta mais rápido em comparação ao controlador PID. Além disso, presume-se que o controlador FUZZY será mais robusto diante de variações nas condições de operação, como mudanças na carga e perturbações externas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O IFTM campus Paracatu possui, em seu laboratório de Automação, uma planta didática de controle que simula com grande riqueza de detalhes um processo industrial complexo. A Figura 1 mostra algumas fotos dessa planta didática.

**Figura 1** - Planta de ensaios de malhas de controle PDH-ATK 1001 com comunicação HART e sensores SMAR, projetada pelo grupo AUTHOMATHIKA.



Fonte: EXSTO, 2024.

O painel da planta didática possui um CLP GE Fanuc modelo VersaMax IC200CPUE05, que controla todos os dispositivos da planta, o qual é mostrado na Figura 2.

**Figura 2** - Foto do CLP GE Fanuc modelo VersaMax IC200CPUE05 existente no painel da planta didática do Laboratório do IFTM campus Paracatu.



Fonte: QUICKTIME ONLINE, 2024.

Através do bloco de controle Fuzzy desenvolvido em um projeto de Iniciação Científica (Edital 12/2022 IFTM Paracatu), pretende-se implementar em um sistema real e compará-lo ao controle PID. Para isso será utilizado uma malha de controle de nível de tanques. Os testes de comparação entre o desempenho dos dois controladores serão realizados para uma variação em degrau (mudança repentina do *Setpoint*, ou seja, do valor desejado) e para uma perturbação na variável controlada. Desta forma as variáveis serão colocadas em gráficos e serão utilizados os seguintes parâmetros de comparação: tempo de subida, tempo de pico, sobressinal máximo e tempo de estabilização.

Vários trabalhos na literatura realizam o desenvolvimento e implementação da Lógica Fuzzy em CLP's nas indústrias, como o trabalho de Baldovino e Dadios (2014) aborda o uso de controladores Fuzzy em sistemas autônomos e robótica. Intitulado "Aplicações de Controle Fuzzy em Sistemas Robóticos", o estudo foca em como a lógica Fuzzy pode ser aplicada para melhorar o desempenho de robôs em ambientes dinâmicos e incertos. Já o trabalho de Kocian, Koziorek e Pokorn (2011) aborda a aplicação de controladores Fuzzy em sistemas complexos, enfatizando seu uso em situações em que há incertezas ou onde os modelos matemáticos tradicionais são difíceis de aplicar.

O estudo, intitulado "Aplicação de Controladores Fuzzy em Sistemas Dinâmicos Não Lineares," discute como a lógica Fuzzy pode ser uma alternativa eficaz aos métodos de controle convencionais, como o PID, especialmente em sistemas não lineares. Também o trabalho de Pérez, Godoy e Godoy (2014) discute a lógica Fuzzy como uma poderosa ferramenta para o controle de sistemas complexos e incertos. Os autores apresentam uma série de aplicações práticas em diferentes áreas, como automação industrial, robótica, e sistemas de controle ambiental, demonstrando a versatilidade e eficácia da lógica Fuzzy em situações em que é difícil definir modelos matemáticos precisos. Porém nenhum deles é voltado ao CLP utilizado na planta didática do IFTM campus Paracatu, o CLP GE Fanuc VersaMax IC200CPUE05.

Diante do exposto, este projeto de pesquisa está delimitado à comparação dos controladores FUZZY e PID aplicados ao controle de nível da planta didática do IFTM Paracatu, a qual se utiliza o modelo GE FANUC IC200CPUE05. A análise

é focada em aspectos específicos como precisão, estabilidade, tempo de resposta e robustez dos controladores frente a variações nas condições de operação.

A implementação dos controladores foi realizada utilizando o CLP da planta didática, e a partir de uma interface visual possibilitou a configuração dos parâmetros da lógica FUZZY. A comparação foi feita utilizando os mesmos sistemas e configurações de teste, e os resultados documentados através de gráficos de comportamento do sistema.

Além disso, deve-se considerar a adaptação do bloco FUZZY de um projeto de pesquisa anterior, já supracitado (Edital 13/2022) para o controle de nível. As avaliações estão restritas ao ambiente da planta didática, sem extrapolar para outras plantas ou contextos industriais, embora as conclusões forneçam *insights* para futuras aplicações industriais e educacionais.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

O estudo tem como objetivo avaliar e comparar o desempenho dos controladores PID e FUZZY aplicados à planta didática de controle de nível do IFTM Paracatu, analisando critérios como precisão, estabilidade, robustez e facilidade de implementação. A pesquisa proporcionará uma visão aprofundada sobre as vantagens e limitações de cada método, contribuindo para a formação de profissionais capacitados na utilização de técnicas avançadas de controle industrial.

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar a precisão, estabilidade e tempo de resposta dos controladores PID e FUZZY, investigando também o comportamento diante de variações operacionais e dificuldades de implementação;
- Desenvolver e validar modelos de controle PID e FUZZY para a planta didática;

- Implementar os sistemas de controle no CLP da planta didática e utilizar uma interface visual para configuração dos parâmetros da lógica FUZZY;
- Comparar os controladores FUZZY e PID, utilizando o mesmo sistema de teste e configurações, documentando vantagens e limitações de cada abordagem.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 CONTROLE DE SISTEMAS

O controle de sistemas é uma área fundamental da engenharia que lida com a regulação de variáveis de processo para atingir um comportamento desejado. Controladores são dispositivos ou algoritmos projetados para minimizar o erro entre a saída desejada e a saída real de um sistema dinâmico. Os sistemas de controle podem ser classificados como abertos ou fechados, sendo os sistemas de controle em malha fechada aqueles que utilizam o *feedback* da saída para ajustar continuamente o sinal de controle e manter a estabilidade e o desempenho do sistema (Ogata, 2010).

Um sistema de controle típico consiste em uma planta, que é o processo físico a ser controlado, sensores para medir variáveis de processo (como temperatura, pressão, nível, etc.), atuadores que ajustam entradas para corrigir desvios, e um controlador que calcula as ações necessárias para manter a saída desejada. As variáveis de processo podem ser classificadas em variáveis manipuladas, que são controladas diretamente pelos atuadores, e variáveis controladas, que são as saídas de interesse que se deseja manter em um determinado valor ou intervalo.

### 2.2 PLANTA DIDÁTICA

A planta didática de ensaios de malha de controle PDH-ATK 1001, mostrada anteriormente na Figura 1, é um sistema experimental projetado para estudos de controle de processos, utilizado em ambientes educacionais como o Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM), Campus Paracatu. Esta planta é especificamente desenvolvida para fins didáticos, permitindo que alunos e pesquisadores aprendam e experimentem conceitos fundamentais de controle automático, como sintonia de controladores, resposta transitória, e comportamento em regime permanente.

A planta didática PDH-ATK 1001, cujo catálogo pode ser encontrado em

Exsto (2024), é composta por um conjunto de componentes que simulam um sistema industrial de controle de nível de líquidos. Entre seus principais componentes estão os tanques de processo, os sensores de nível, válvulas de controle, bombas. Além disso, ela possui um programador Hart (que é um protocolo de rede industrial) para configuração dos parâmetros dos sensores inteligentes, e conta com um sistema supervisório *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA). Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados, para visualização das informações do processo em uma tela de computador.

Dito isso, é importante ressaltar que a planta didática é projetada para simular uma ampla variedade de cenários de controle de processos. Entre as aplicações práticas, destacam-se o controle de nível, estudo de controladores (que nesse projeto aborda-se sobre o FUZZY e PID), análise dinâmica de sistemas, entre outros pontos que são importantes em se tratando de estudos e adquirir conhecimento.

Portanto, o uso da planta em um ambiente acadêmico promove o desenvolvimento de habilidades práticas em instrumentação, coleta de dados, ajuste de parâmetros e análise de desempenho, preparando os estudantes para desafios reais na indústria. A possibilidade de operar com diferentes estratégias de controle (neste caso o PID e FUZZY), oferece uma base sólida para que os alunos compreendam como escolher e ajustar controladores de acordo com as características específicas de cada processo.

### **2.3 PLC GE FANUC – VersaMax IE200CPUE05**

O PLC GE FANUC VersaMax é uma linha de controladores lógicos programáveis desenvolvida pela General Electric (GE), atualmente parte da Emerson Electric, que foi projetada para oferecer alta flexibilidade, escalabilidade e robustez em aplicações industriais. O modelo VersaMax destaca-se pela sua modularidade, permitindo que módulos adicionais sejam acoplados para expandir suas capacidades conforme as necessidades de cada aplicação.

O modelo do CLP em questão trata-se do IE200CPUE05 já mostrado na

Figura 2, cujo catálogo pode ser encontrado em *Quicktime Online* (2024), trata-se de um CLP projetado para gerenciar as operações de controle em ambientes industriais. Algumas de suas características principais incluem:

- **Processador Integrado:** Possui uma CPU eficiente para execução de programas lógicos e operações de controle com alta velocidade e precisão.
- **Memória e Armazenamento:** O VersaMax IE200CPUE05 oferece uma quantidade significativa de memória para armazenamento de programas de controle e dados do processo, facilitando o desenvolvimento de aplicações complexas.
- **Modularidade e Expansibilidade:** Permite a conexão de vários módulos de entrada/saída (I/O) digitais e analógicos, o que torna o controlador escalável e adaptável a diferentes tamanhos e tipos de aplicações industriais.
- **Comunicação Industrial:** Suporta diversos protocolos de comunicação industrial, como Ethernet, Profibus e Modbus, permitindo a integração em redes de automação complexas e facilitando o monitoramento e controle remoto.
- **Facilidade de Programação:** Utiliza *software* de programação como o **Proficy Machine Edition** da GE, que permite a criação e depuração de programas lógicos através de uma interface amigável baseada em blocos de função, diagramas ladder (LD), texto estruturado (ST), entre outros.

Por fim o PLC GE FANUC VersaMax IE200CPUE05 é uma solução versátil e eficiente para automação industrial. Com suas características avançadas de processamento, comunicação, modularidade, e facilidade de programação, ele é ideal para uma ampla gama de aplicações, desde controle de máquinas até sistemas complexos de controle de processos. Também disponível para fins didáticos no IFTM campus Paracatu.

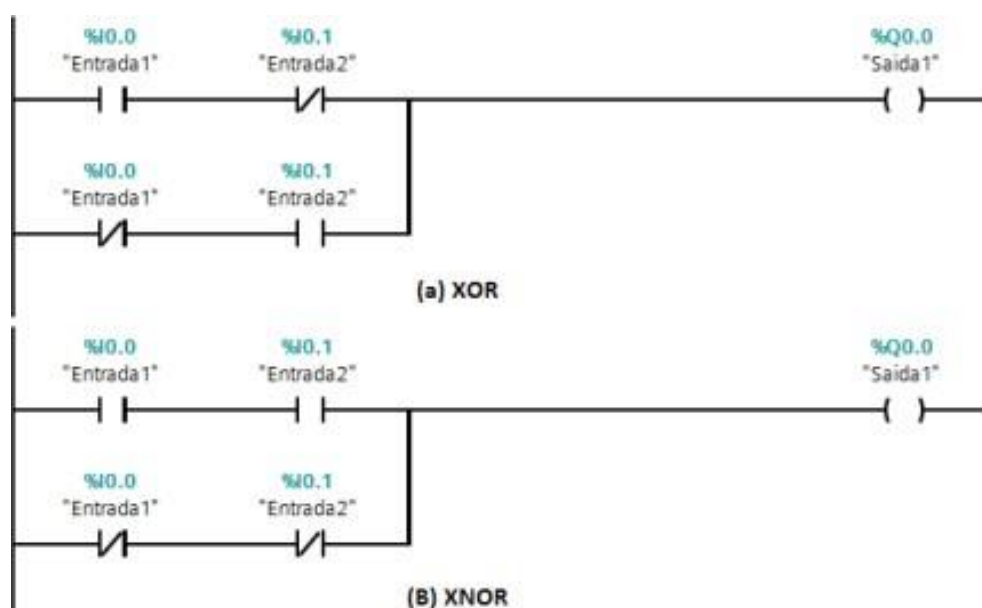


## 2.4 LÓGICA DE CONTROLE FUZZY E PID

Para programar o CLP que existe nessa planta, GE Fanuc modelo VersaMax, é necessário o *software* Proficy Machine Edition (GE, 2023). Esse *software* permite que as lógicas de programação sejam feitas em várias linguagens de programação de CLP, as quais são padronizadas pela norma IEC 61131-3. As linguagens padronizadas, e suas respectivas siglas, são: Diagrama Ladder (LAD), Blocos Funcionais (FBD), Texto Estruturado (ST) e Lista de Instruções (IL). A seguir é mostrado o princípio básico de programação das linguagens Ladder e Blocos, ambas linguagens gráficas, as quais foram utilizadas no desenvolvimento do projeto.

- Diagrama Ladder: A linguagem Ladder foi a primeira lógica de programação de CLP's, e trazia em sua concepção a facilidade na programação, buscando a rápida adaptação dos eletricitistas, os quais eram acostumadas com os diagramas elétricos e às lógicas a relés, feitas com dispositivos elétricos como relés, contatores e temporizadores, Figura 3.

**Figura 3** - Exemplo de programação em linguagem de Diagrama Ladder (LAD).

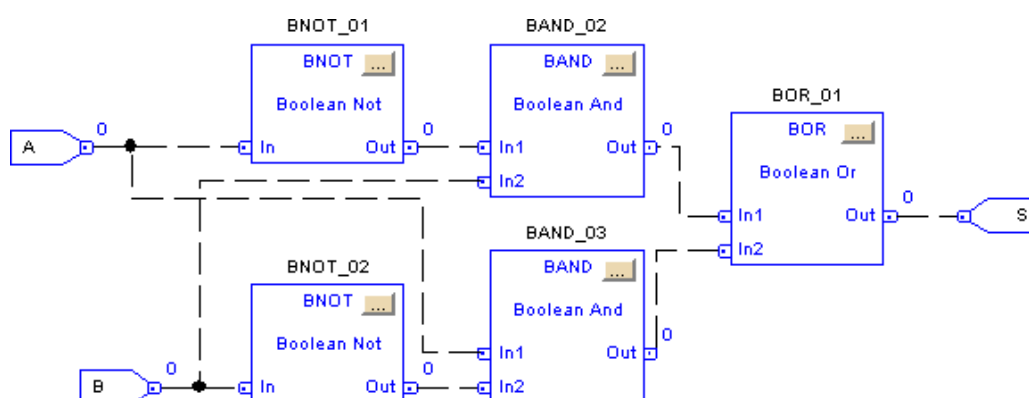


Fonte: Minipa do Brasil Ltda, 2017.

- Blocos Funcionais: essa linguagem é bem semelhante à utilizada em *softwares* comuns do meio acadêmico, como o SIMULINK, em que

blocos são utilizados para ligar sinais e, assim, realizar uma lógica de controle. Se parece um pouco com o conceito das portas lógicas, em que cada bloco possui uma função lógica, e possui um conjunto de entradas e saídas. Conexões entre os blocos, por meio de linhas representam passagem dos valores por esses “fios”. A lógica interna desses blocos pode ser formada por outras linguagens, isso ajuda muito em casos em que se tem lógicas complexas que são utilizadas várias vezes. A Figura 4 ilustra um exemplo de programação em blocos.

**Figura 4** - Exemplo de implementação da linguagem de CLP Diagrama de Blocos Funcionais.



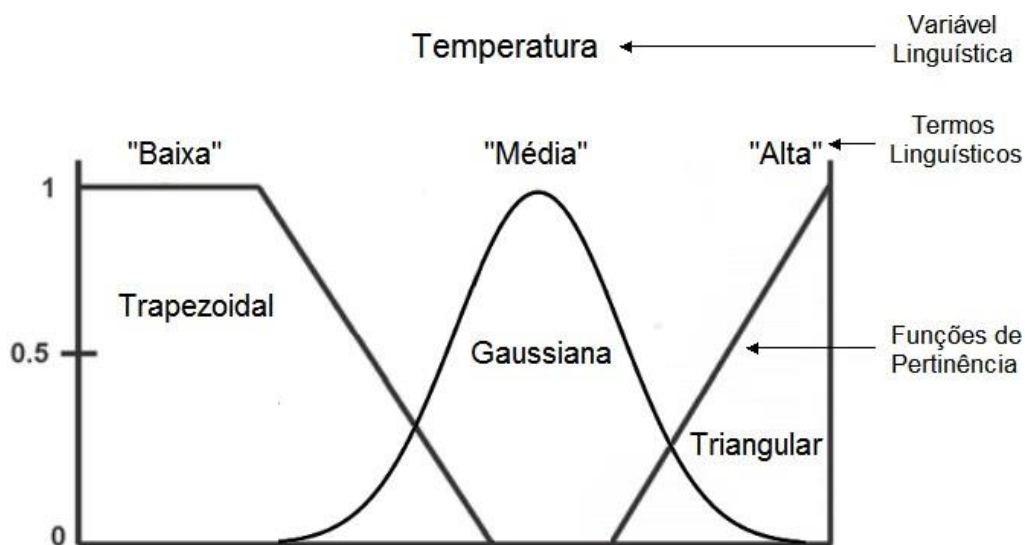
Fonte: Mesh Engenharia - Automação e Controle, 2024.

A lógica Fuzzy, proposta por Zadeh em 1965, oferece uma abordagem alternativa aos métodos tradicionais de controle. Ela é especialmente eficaz para lidar com incertezas e imprecisões típicas de sistemas complexos, onde os modelos matemáticos precisos são difíceis de obter (Klir; Yuan, 1995). Ao contrário dos sistemas binários clássicos, que operam apenas com verdadeiro ou falso, a lógica Fuzzy permite que variáveis tenham valores intermediários entre 0 e 1, representando graus de verdade.

Controladores Fuzzy utilizam um conjunto de regras baseadas na lógica Fuzzy para tomar decisões de controle. Essas regras são formuladas de maneira semelhante à lógica humana, utilizando termos linguísticos como "baixo", "médio", e "alto" para representar variáveis de entrada e saída. A inferência Fuzzy é então realizada por meio da aplicação de operadores Fuzzy, como a união (máximo) e a interseção (mínimo), para combinar as regras e determinar a ação de controle

adequada (Ross, 2010). As funções de pertinência também podem ser de vários formatos, como triangular, trapezoidal e gaussiana (Silva, 2011). A Figura 5 mostra as funções de pertinência e as variáveis e termos linguísticos.

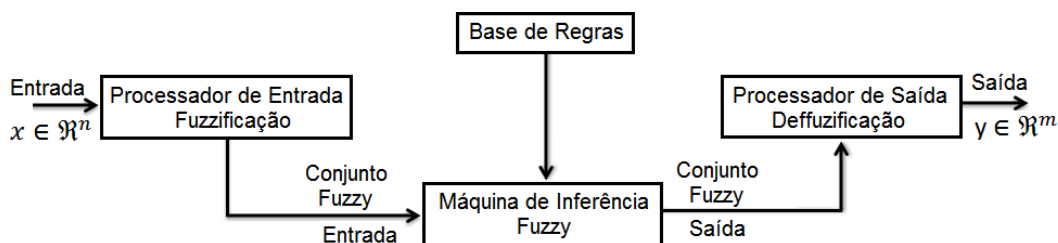
**Figura 5** - Variável linguística, Termos linguísticos e funções de pertinência.



Fonte: Adaptado de SILVA, 2011.

O sistema completo do Controlador Fuzzy é composto por quatro partes: Fuzzificação, Máquina de Inferência, Base de Regras e a Defuzzificação, conforme mostrado no diagrama da Figura 6.

**Figura 6** - Blocos do sistema do Controlador Fuzzy.



Fonte: Adaptado de SILVA, 2011.

A Fuzzificação consiste em modelar o problema real nos conjuntos Fuzzy, assim, surge a necessidade de um especialista no processo em questão para projetar os seguintes parâmetros: regras Fuzzy, variáveis linguísticas, termos linguísticos e funções de pertinência.

Existem três métodos de inferência: Mamdani, Takagi-Sugeno (T-S) e Tsukamoto, sendo os dois primeiros mais conhecidos. O método de Mamdani é

baseado na composição max-min, onde obtém-se o mínimo das entradas (antecedentes) para cada regra Fuzzy e depois é obtido a saída (consequente) através do resultado máximo. A diferença básica entre os métodos de Mamdani e Takagi-Sugeno estão na forma de escrever o consequente (saída) de cada regra e no processo de Defuzzificação. O método de Takagi-Sugeno utiliza qualquer tipo de função no consequente, já o de Mamdani apenas funções pré-determinadas, como triangular, gaussiana e trapezoidal.

O Quadro 1 ilustra um conjunto de regras utilizando termos linguísticos, mas essas regras são aplicadas a funções de pertinência do tipo triangular, trapezoidal ou gaussiana, as quais podem ser configuradas (maiores ou menores) em função da não linearidade do sistema a ser controlado.

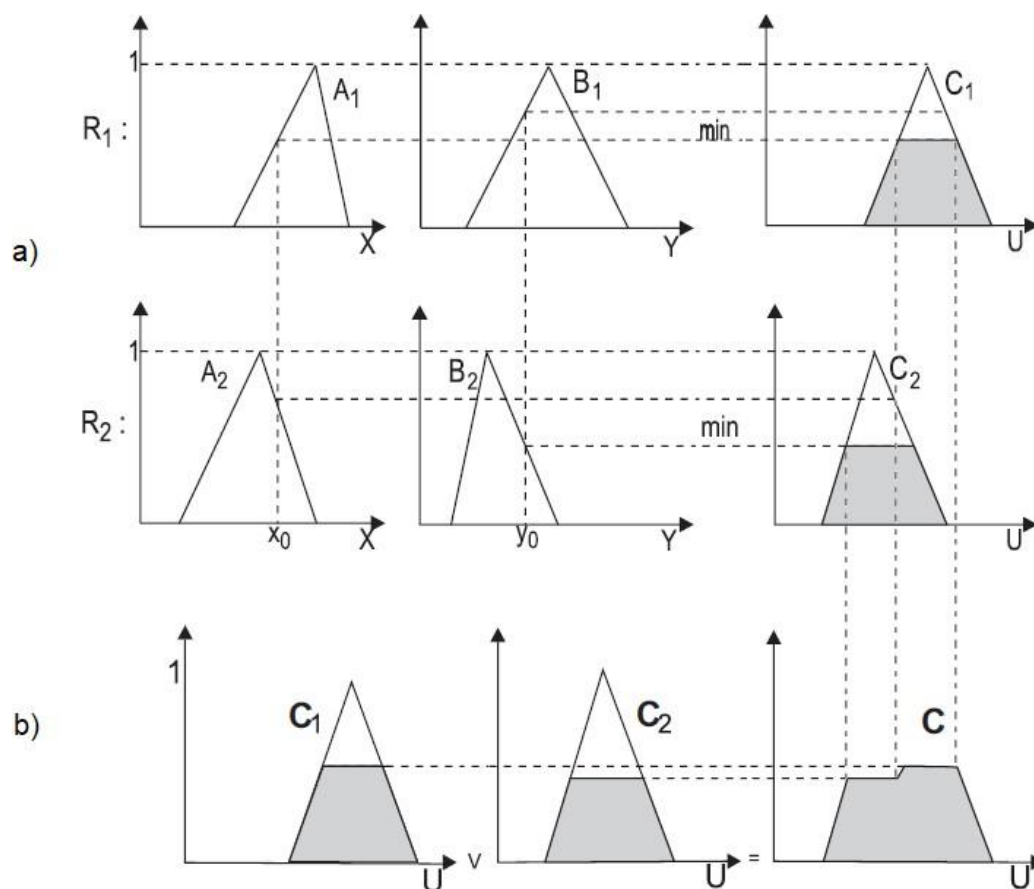
**Quadro 1** - Regras de um sistema de tomada de decisão de lavagem de roupa.

<p><b>R1:</b> Se a roupa é "grossa" e a sujeira é "difícil" então lava-se "muito tempo".</p> <p><b>R2:</b> Se a roupa é "grossa" e a sujeira é "fácil" então lava-se "em tempo médio".</p> <p><b>R3:</b> Se a roupa é "fina" e a sujeira é "fácil" então lava-se "pouco tempo".</p> <p><b>R4:</b> Se a roupa é "fina" e a sujeira é "difícil" então lava-se "pouco tempo".</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Adaptado de SILVA, 2011.

A Figura 7 mostra um sistema de controle Fuzzy com duas entradas (A1 e B1), com duas regras (R1 e R2). Na Figura 7(a) é feito o processo de Fuzzificação, onde em cada regra é analisado o valor mínimo de cada entrada, obtendo as funções triangulares de respostas parciais C1 e C2, respectivamente. A Figura 7(b) mostra como é realizada a inferência por meio do método de Mamdani, em que se utiliza os valores máximos entre os resultados parciais de C1 e C2, ponto a ponto, para gerar a função triangular C.

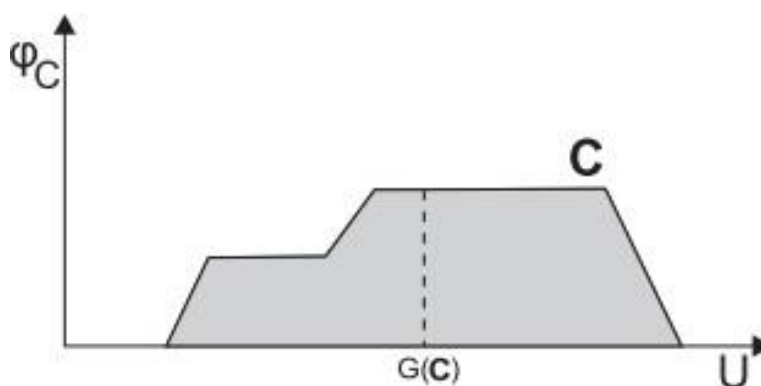
**Figura 7** - Representação gráfica de: a) regras Fuzzy, expressões de inferência (Mamdani), b) Inferência Fuzzy pelo método de Mamdani.



Fonte: Adaptado de SILVA, 2011.

Para obter um valor final, que representa a saída da lógica Fuzzy, é feita a Defuzzificação, que consiste em achar o centro de gravidade (ou ainda o centroide) da função “C”, conforme mostrado na Figura 8.

**Figura 8** - Processo de Defuzzificação pelo centro de gravidade.



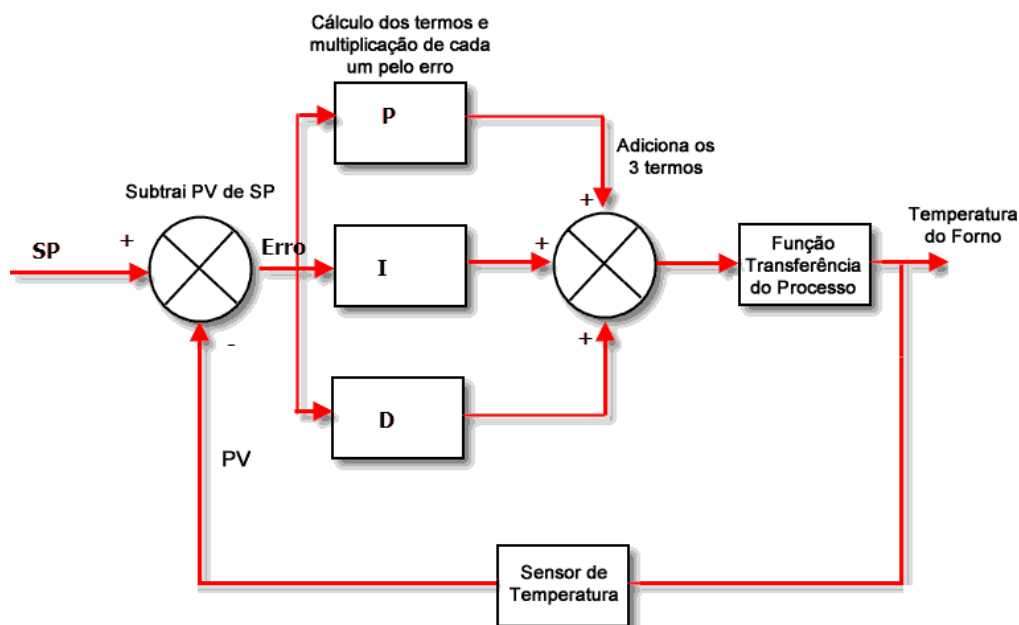
Fonte: Adaptado de Silva, 2011.

A Lógica Fuzzy vem aumentando sua aplicação na área de sistemas de controle, sendo utilizada, inclusive em Rastreadores do Ponto de Máxima frequência (MPPT – *Maximum Power Point Tracker*) de sistemas fotovoltaicos (Moçambique, 2012).

Os controladores PID são amplamente utilizados em sistemas industriais devido à sua simplicidade de implementação, robustez, e eficiência no controle de processos lineares. O controlador PID combina três ações principais: a ação proporcional, que responde ao erro presente; a ação integral, que elimina o erro acumulado ao longo do tempo; e a ação derivativa, que antecipa as tendências futuras do erro com base em sua taxa de variação (Åström; Hägglund, 2006).

Os parâmetros do controlador PID — ganho proporcional ( $K_p$ ), ganho integral ( $K_i$ ), e ganho derivativo ( $K_d$ ) — são ajustados para obter um equilíbrio ótimo entre resposta rápida, mínima oscilação e erro estacionário aceitável. Embora eficazes em muitas aplicações, os controladores PID podem apresentar limitações quando aplicados a sistemas não lineares, ou a sistemas com características altamente variáveis ou incertas (Ogata, 2010). O princípio de funcionamento pode ser retratado na Figura 9.

**Figura 9** - Diagrama de Blocos de um Controlador PID em Malha Fechada para Controle de Temperatura.



Fonte: Adaptado de Ogata, 2010.

Por fim a escolha entre controladores PID e Fuzzy depende de diversos fatores, como a natureza do sistema a ser controlado, as características da planta, e os requisitos de desempenho. Controladores PID são ideais para sistemas lineares e bem modelados, onde a sintonia dos parâmetros pode ser feita de maneira eficiente para alcançar desempenho ótimo (Åström; Hägglund, 2006). No entanto, em sistemas complexos ou não lineares, onde há incerteza ou onde as características da planta mudam ao longo do tempo, os controladores Fuzzy podem oferecer melhor desempenho devido à sua capacidade de lidar com imprecisões e adaptar-se a novas condições de operação (Wang, 1997).

## 2.5 FERRAMENTA PARA SIMULAÇÃO – MATLAB FUZZY LOGIC TOOLBOX

O *Fuzzy Logic Toolbox* é uma ferramenta integrada ao MATLAB, um ambiente amplamente utilizado para cálculos numéricos e análise de dados. Este *toolbox* fornece um conjunto de funções e uma interface gráfica para o desenvolvimento, simulação e análise de sistemas de controle baseados em lógica Fuzzy. Ele é projetado para ajudar a criar sistemas que imitam o raciocínio humano em situações de incerteza.

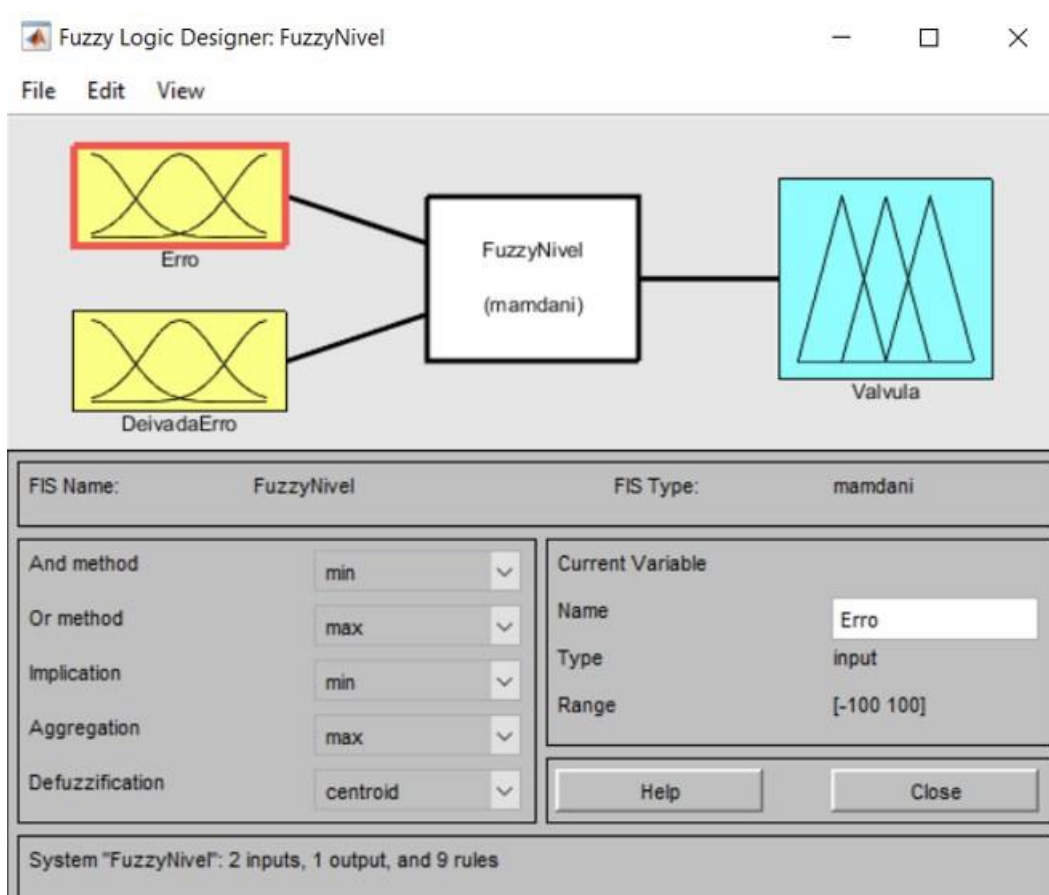
Principais Funcionalidades do *Fuzzy Logic Toolbox*:

- **Definição de Conjuntos Fuzzy:** Permite criar e manipular conjuntos Fuzzy, especificando funções de pertinência (*membership functions*) para representar o grau de pertencimento de elementos a diferentes conjuntos.
- **Regras Fuzzy:** Facilita a criação de regras Fuzzy na forma de "Se-Então" (*IF-THEN*) que são usadas para descrever o comportamento do sistema baseado em entradas imprecisas.
- **Inferência Fuzzy:** Implementa métodos de inferência Fuzzy, como o método de Mamdani e o método de Sugeno, para determinar saídas a partir das regras Fuzzy definidas.

- **Simulação e Análise:** Permite a simulação e análise de sistemas Fuzzy, visualizando superfícies de resposta e outras representações gráficas que ajudam a entender o comportamento do sistema.
- **Integração com o Simulink:** O toolbox pode ser integrado ao Simulink, permitindo a criação de modelos híbridos que combinam lógica Fuzzy com outras técnicas de controle.

O *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB é uma ferramenta poderosa para o desenvolvimento de sistemas de controle baseados em lógica Fuzzy. Sua capacidade de lidar com incertezas e de se integrar a outras ferramentas de simulação e controle torna-o indispensável para quem busca soluções avançadas em controle de processos e sistemas complexos. Na Figura 10 é possível observar a ferramenta para simulações.

**Figura 10** - Representação da Ferramenta Matlab Fuzzy Logic Toolbox.

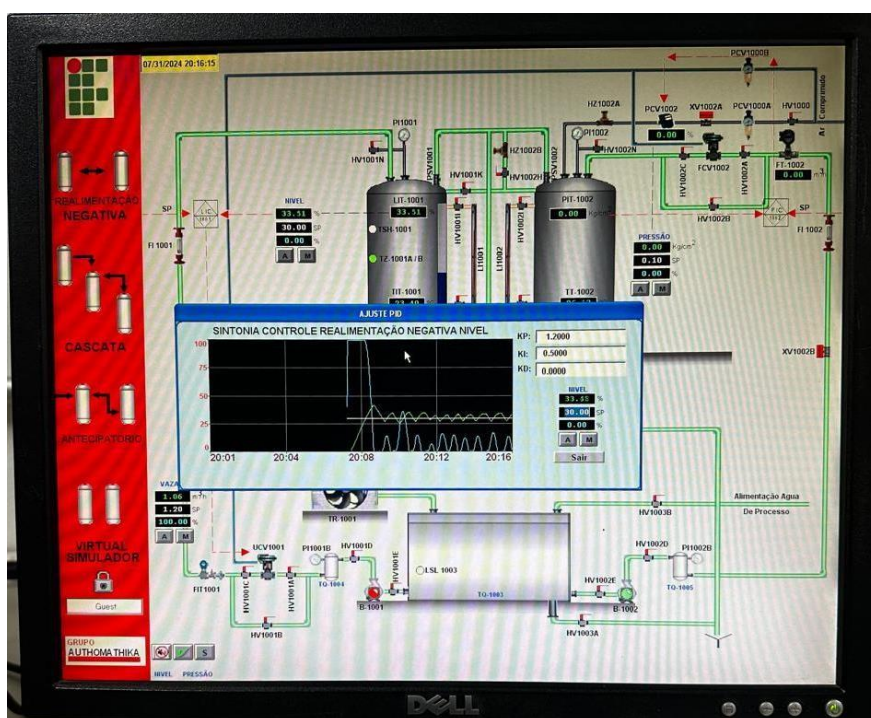


Fonte: Próprio Autor, 2024.



Por fim, para o desenvolvimento da interface supervisório, foi desenvolvido através do Indusoft Web Studio, trata-se de uma plataforma SCADA usada para desenvolver sistemas de supervisão e controle de processos industriais, permitindo criar interfaces homem-máquina (Silva, 2020). Suporta diversos protocolos de comunicação, como Modbus e OPC, e integra diferentes dispositivos, garantindo a interoperabilidade em ambientes industriais (Mendes et al., 2019). Com sua flexibilidade para operar em diferentes sistemas e ser acessado remotamente, o Indusoft se destaca na Indústria 4.0 por facilitar a conectividade e a análise de dados em tempo real (Oliveira; Costa, 2021; Ferreira, 2018). A Figura 11, mostra a tela do supervisório desenvolvida através do *software* Indusoft.

**Figura 11** - Tela do supervisório desenvolvida através do Idusoft Web Studio.



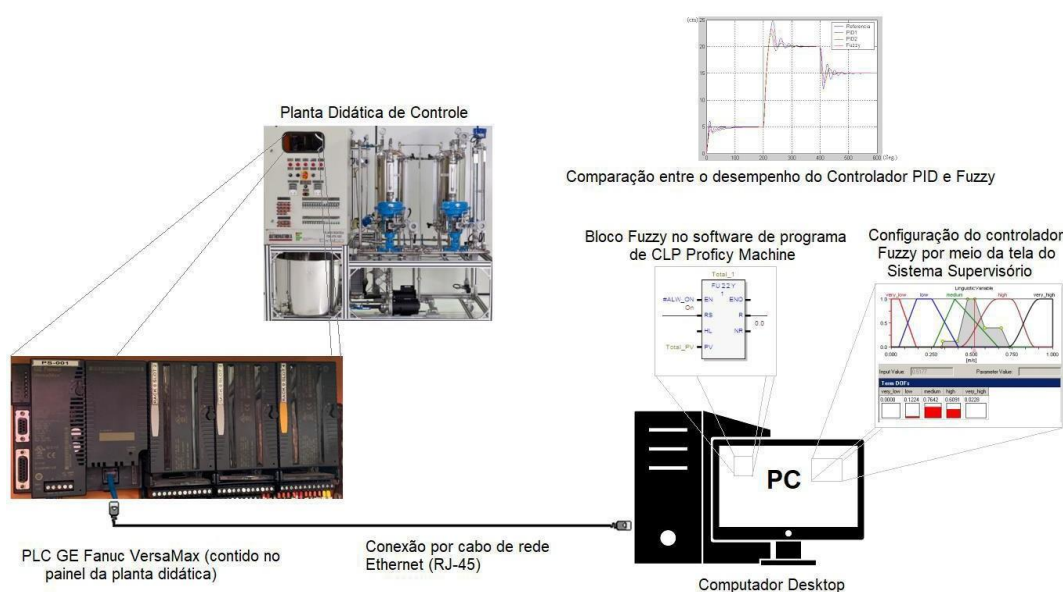
Fonte: Próprio Autor, 2024.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desta pesquisa é pautada em entender a lógica Fuzzy, em que se realiza a revisão completa dessa lógica, primeiramente, foram feitos testes em ambientes de simulação computacional como, por exemplo, o *software* Matlab (*Fuzzy Logic Toolbox*). Isso é necessário para o entendimento sobre a lógica Fuzzy.

A Figura 12 mostra o diagrama de funcionamento do sistema proposto neste estudo, envolvendo a planta didática, o CLP e o computador utilizado para programar o bloco Fuzzy e a tela de supervisor de configuração visual.

**Figura 12** - Diagrama de funcionamento do sistema desenvolvido neste projeto, mostrando a planta didática, PLC e o computador para programação do bloco Fuzzy.



Fonte: Próprio Autor, 2024.

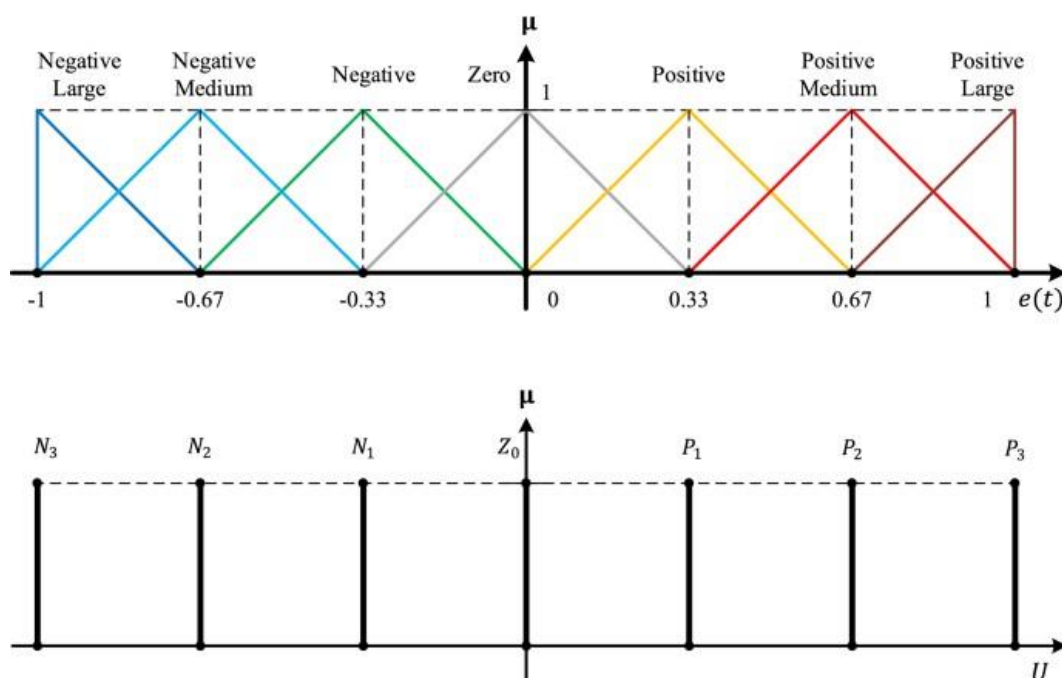
A metodologia a ser utilizada é a pesquisa exploratória, em que houve a familiarização com o problema dessa pesquisa, que é a utilização da lógica Fuzzy, a qual melhor se adequa a situação de controle de sistemas não lineares. Utilizando o bloco Fuzzy já desenvolvido em outra Iniciação Científica (Edital 13/2022), como já citado nessa pesquisa, desenvolvido e aplicado para outro CLP (WEG300), de tal forma que para esse projeto foi necessário adaptar o bloco Fuzzy para o PLC da bancada didática, e por fim realizar a comparação entre os controladores FUZZY e PID.

Em um primeiro momento foi necessário adaptar a lógica de controle

aplicada ao CLP WEG 300 já mencionado, para um modelo também usual do Fuzzy chamado de *Singletons*, essa abordagem é uma forma simplificada de representar conjuntos Fuzzy em sistemas de inferência. Em vez de definir funções de pertinência complexas, onde uma variável de entrada pode assumir diversos valores dentro de um intervalo, os *singletons* representam cada conjunto Fuzzy como um único valor preciso, ou seja, um valor "*crisp*" no qual toda a pertinência é concentrada (Ross, 2004).

Um *singleton* é um conjunto Fuzzy cuja função de pertinência é igual a 1 para um único ponto específico no universo de discurso e 0 para todos os outros pontos. Na prática, isso significa que o conjunto Fuzzy é representado por um ponto único, simplificando as operações de inferência Fuzzy, especialmente em sistemas de controle (Sugeno, 1985). Para melhor exemplificar a funcionalidade dessa forma de representar o conjunto Fuzzy seria: Considerando um conjunto Fuzzy "temperatura média" para a variável "temperatura", um *singleton* poderia ser representado por um valor específico, como 25°C, com uma função de pertinência de 1 nesse ponto e 0 em qualquer outro valor.

**Figura 13** - Representação gráfica das funções de pertinências Triangular e Singletons.



Fonte: Adaptado de Sugeno, 1985.

Como pode ser observado na Figura 13, há a representação gráfica das

funções de pertinência para as variáveis de entrada e saída em um sistema de controle Fuzzy. A parte superior da figura mostra as funções de pertinência triangular para a variável de erro  $e(t)$ , categorizadas como "Negative Large", "Negative Medium", "Negative", "Zero", "Positive", "Positive Medium", e "Positive Large". A parte inferior da figura representa os *singletons* das variáveis de saída U, designados como N3, N2, N1, Z0, P1, P2 e P3. Essa representação ilustra como as variáveis de entrada são mapeadas para valores de saída utilizando a abordagem de *singletons* em um sistema de inferência Fuzzy.

Tendo a intenção de trabalhar com os *Singletons* devido as suas vantagens como simplificação computacional, facilidade de implementação e melhoria de desempenho em sistemas de controle, foram realizadas adaptações para o modelo da função de pertinência Fuzzy triangular, pois é uma função que já sabia-se trabalhar em diagramas de bloco e ladder, e que não fugiria da ideia principal da aplicação que é o controle de sistemas. Na Figura 14, é possível observar as regras para tomada de decisão e na Figura 15 como foram feitas as adaptações.

**Figura 14** - Regras para a tomada de decisão.

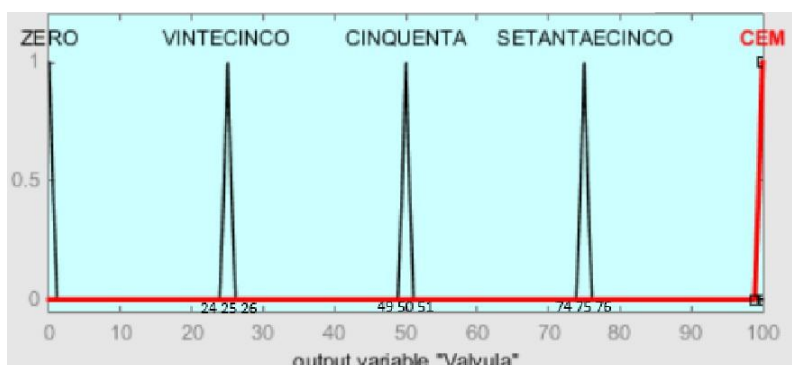
```

1. If (Erro is Negativo) and (DeivadaErro is Negativa) then (Valvula is ZERO) (1)
2. If (Erro is Negativo) and (DeivadaErro is Zero) then (Valvula is VINTECINCO) (1)
3. If (Erro is Negativo) and (DeivadaErro is Positiva) then (Valvula is CINQUENTA) (1)
4. If (Erro is Zero) and (DeivadaErro is Negativa) then (Valvula is VINTECINCO) (1)
5. If (Erro is Zero) and (DeivadaErro is Zero) then (Valvula is CINQUENTA) (1)
6. If (Erro is Zero) and (DeivadaErro is Positiva) then (Valvula is SETANTAECINCO) (1)
7. If (Erro is Positivo) and (DeivadaErro is Negativa) then (Valvula is CINQUENTA) (1)
8. If (Erro is Positivo) and (DeivadaErro is Zero) then (Valvula is SETANTAECINCO) (1)
9. If (Erro is Positivo) and (DeivadaErro is Positiva) then (Valvula is CEM) (1)

```

Fonte: Próprio Autor, 2024.

**Figura 15** - Adaptações feita para uma função de pertinência próxima de um Singleton.



Fonte: Próprio Autor, 2024.

Feito isso, e aproveitando a lógica de controle em Ladder desenvolvida no trabalho de Lauro Silva Rocha intitulado “**Implementação de controlador Fuzzy em CLP de pequeno porte utilizando lógica Ladder**”, foram realizadas as alterações necessárias no programa *Proficy Machine Edition* para o CLP VersaMax IE200CPUE05, e de forma que se adequassem ao modelo da função de pertinência *Singleton/Triangular*, dentre essas alterações na lógica de controle, foi necessário incrementar também o Bloco PI Incremental, para que durante o processo, o sistema de controle buscasse atualizar em intervalos, a saída do controlador.

Para uma melhor explicação desse bloco PI Incremental, pode-se defini-lo como uma versão modificada do controlador PI convencional, projetada para calcular as mudanças incrementais na saída do controlador a cada passo de tempo, em vez de calcular a saída total diretamente. Esse método é particularmente útil em sistemas digitais ou discretos, como controladores lógicos programáveis (PLCs), onde o controle é atualizado em intervalos regulares (Astrom; Hagglund, 1995; Ogata, 2010)

O controlador PI Incremental utiliza a seguinte equação para calcular o incremento da saída de controle:

$$\Delta u(t) = K_p [e(t) - e(t-1)] + K_i \cdot e(t) \cdot \Delta t \quad (1.1)$$

Onde:

- $\Delta u(t)$  = Incremento da saída de controle no tempo t.
- $K_p$  = Ganho proporcional.
- $K_i$  = Ganho integral.
- $e(t)$  = Erro no tempo t (diferença entre o valor de referência e o valor medido).
- $e(t-1)$  = Erro no tempo anterior t-1.
- $\Delta t$  = Intervalo de tempo entre as atualizações do controlador.

Seu funcionamento passo a passo é:

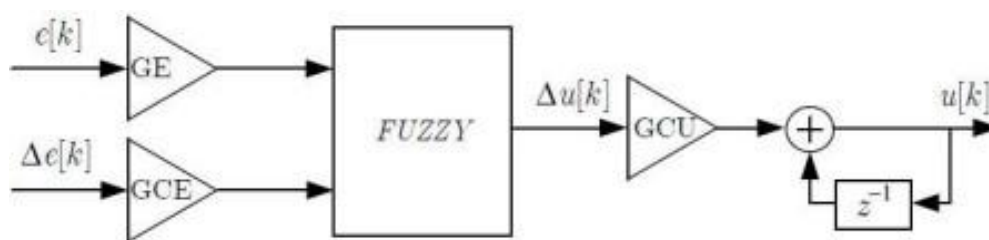
- I. **Cálculo do Erro Atual:** O erro  $e(t)$  é calculado como a diferença entre o valor de referência (*setpoint*) e o valor medido da variável controlada no

tempo  $t$ .

- II. **Cálculo do Incremento da Ação de Controle:** A cada passo de tempo, o controlador PI incremental calcula o incremento da saída de controle ( $\Delta u(t)$ ) com base na mudança do erro proporcional desde o último passo de tempo ( $e(t) - e(t-1)$ ) e no erro acumulado até o momento ( $e(t) \cdot \Delta(t)$ ).
- III. **Atualização da Saída de Controle:** A saída de controle atual  $u(t)$  é então obtida somando o incremento calculado ao valor da saída anterior:
 
$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \quad (1.2)$$
- IV. **Aplicação da Saída ao Sistema:** A nova saída  $u(t)$  é aplicada ao atuador do sistema, por exemplo, para ajustar a abertura de uma válvula, a velocidade de um motor etc.

Esse bloco Fuzzy PI incremental Fuzzy pode ser observado na Figura 16.

**Figura 16** - Diagrama de blocos do controlador Fuzzy Incremental PI.



Fonte: Laboratório 3 – Controle Nebuloso (USP), 2020.

Neste diagrama,  $e[k]$  representa o erro de tempo discreto para a amostra atual e  $\Delta e[k]$  o erro para uma amostra anterior. Os ganhos de escalonamento GE e GCE ajustam os sinais de entrada ao sistema fuzzy, que calcula o incremento da saída de controle  $\Delta u[k]$ . O ganho GCU ajusta este incremento, e a soma acumulada gera a saída de controle  $u[k]$  para o próximo passo de tempo.

Portanto para a realização desse projeto foi essencial a utilização de:

#### **Planta Didática de Ensaio de Malhas de Controle PDH-ATK 1001:**

- Equipamento didático com diversas funcionalidades para a simulação de processos industriais, incluindo bombas hidráulicas, válvulas, sensores e

transmissores de temperatura, nível, vazão e pressão.

- Contém um CLP GE Fanuc modelo VersaMax IC200CPUE05, que controla todos os dispositivos da planta.

#### **Computador com *Software* de Programação:**

- Proficy Machine Edition: *Software* utilizado para programar o CLP, compatível com as normas IEC 61131-3 para linguagens de programação de CLP.
- *Software* para configuração do sistema supervisório (SCADA) para visualização das informações do processo.

#### **Equipamentos e Dispositivos Elétricos:**

- Cabo de rede Ethernet (RJ-45) para comunicação entre o computador e o CLP.

#### **Bloco Fuzzy:**

- Adaptado de um projeto anterior de pesquisa (Edital 13/2022) para o controle de nível.

#### **Ambiente de Programação e Testes:**

- Ambiente de programação com linguagens de texto estruturado e gráficos, como o *software* Matlab, para testes e implementação da Lógica Fuzzy.

#### **Material Bibliográfico e Teórico:**

- Livros e artigos acadêmicos para embasamento teórico e revisão da literatura sobre controle PID, lógica Fuzzy e uso de CLPs.

#### **Ferramentas de Análise:**

- *Software* e ferramentas para análise e visualização de dados experimentais, incluindo gráficos de comportamento do sistema e parâmetros de comparação (tempo de subida, tempo de pico, sobressinal máximo e tempo de estabilização).

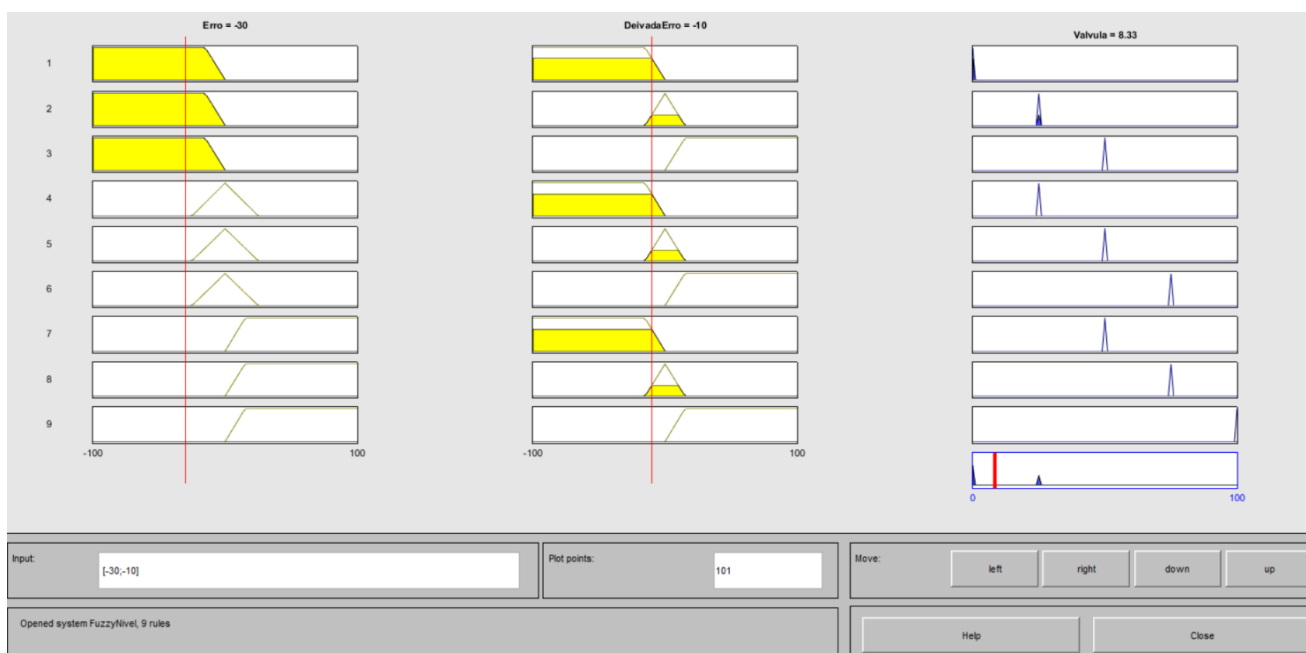
Esses recursos foram fundamentais para o desenvolvimento e execução do projeto, desde a programação e implementação dos controladores até a análise e comparação dos desempenhos dos métodos de controle.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Realizada todas as adaptações do código no *software* de programação Proficy Machine, as quais eram necessárias para o funcionamento no CLP da GE, VersaMax, deu-se a fase de testes e comparações com o simulador do Matlab Fuzzy Logic Toolbox. À medida que os testes iam sendo feitos, faziam-se mudanças na lógica, pois os resultados das saídas no *software* e no simulador do Matlab Figura 17 estavam dando uma divergência muito grande. Até que depois de algumas tratativas, como correções de cálculos, e alguns outros ajustes relacionados ao código, os resultados nas saídas de ambos foram compatíveis, com diferenças de decimais, mas com correspondência entre simulação e real.

**Figura 17** - Simulação no Matlab pelo Fuzzy Logic Toolbox.



Fonte: Próprio Autor, 2024.

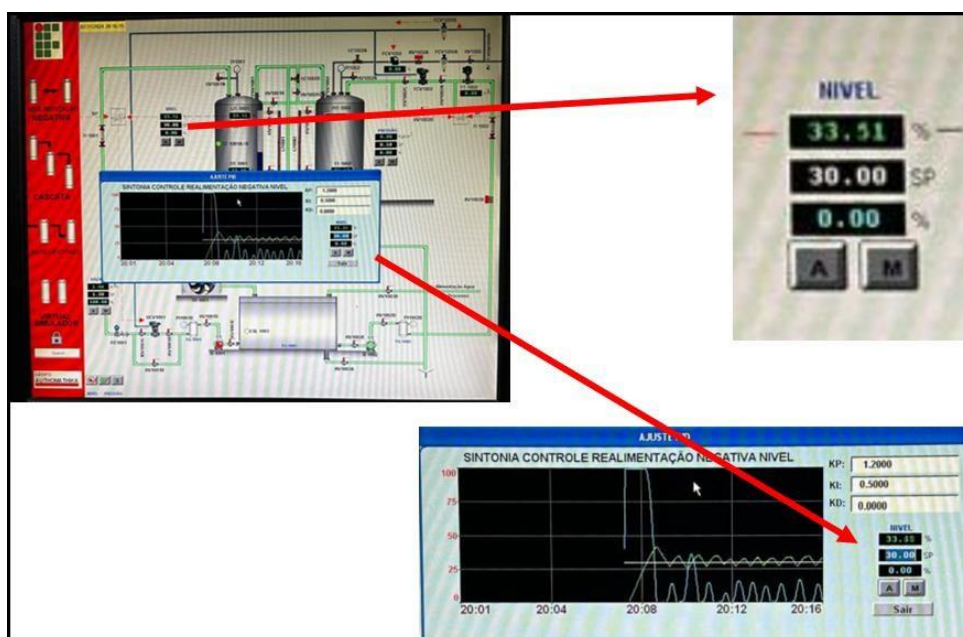
Após a obtenção de um programa funcional, iniciou-se a aplicação na planta de maneira a observar se o programa realmente estaria buscando manter a variável controlada, no *setpoint* desejado. Entretanto mesmo com o programa operante, foi notado que não estava atuando de forma a manter o *Setpoint* desejado, sendo necessário a reavaliação da lógica para descobrir o que estava faltando.

Após realizar algumas verificações bibliográficas, e discussões com pesquisadores da área, chegou-se à conclusão de que o programa não conseguia

buscar o valor desejado, por não realizar o cálculo das mudanças incrementais na saída do controlador. Para sanar esse problema, incrementou-se na lógica um bloco nomeado de PI Incremental, já supracitado, em que sua função é basicamente atualizar o controle em intervalos regulares de tempo.

Feitos os ajustes, iniciou-se novamente os testes, desta vez, com a expectativa de que lógica de controle buscasse manter o valor ajustado, atuando na variável de controle do processo (válvula). Para isso, na tela do Supervisório foi colocado o valor do nível desejado como pode ser observado na Figura 18, e no código foram testados tempos para que a variável de controle fosse atualizada, buscando manter a saída desejada.

**Figura 18** - Tela do Supervisório com o Setpoint desejado de 30.



Fonte: Próprio Autor, 2024.

Para a realização dos testes, é importante frisar que foram mantidos os parâmetros de abertura da válvula de saída do tanque, tanto na aplicação do Fuzzy, quanto na aplicação do PID. Os únicos parâmetros que foram mudados, porém aplicados em ambos os controles foram o intervalo de tempo entre as atualizações do controlador, e o ganho que mantinha a mesma escala, porém com contribuições mais e menos significativas. Dito isso seguem os resultados para os respectivos tipos de controle, com os comentários acerca do observado:

Nas Figuras 19 e 20, pode-se observar o controlador Fuzzy atuando, com um *setpoint* de 50 e 70, respectivamente. Para a variável controlada do processo (Válvula) tem-se uma saída que compreende um intervalo de 0 a 100, de tal forma que quando essa saída for igual à 50, pode-se dizer que o erro é zero, pois o sistema está controlado. O Intervalo de tempo de atualização para esse controle, foi de 3 segundos.

**Figura 19** - Controle Fuzzy para *Setpoint* de 50, com um range de ganho de -50 a 50 (Ganho = 1).



Fonte: Próprio Autor, 2024.

**Figura 20** - Controle Fuzzy para *Setpoint* de 70, com um range de ganho de -50 a 50 (Ganho = 1).



Fonte: Próprio Autor, 2024.

Observa-se que em ambos tiveram problemas quanto a válvula atingir o *setpoint* e mantê-lo, e neste caso sempre ultrapassava um valor aproximado de 2

a 2 unidades de medida, acima do desejado, e abaixo nessa mesma proporção, resultando em uma resposta oscilatória, o que não era desejado. Para esse teste tinha-se um range de **-50 (valores abaixo de zero, quando o sistema está equilibrado 0 a 50) e 50 (valores acima de zero, quando o sistema está equilibrado 50 a 100)** ou seja, não se atuou no ganho do sistema (ganho = 1), e trata-se de um ganho muito alto.

Para saber o quanto a válvula tem que abrir ou fechar, de acordo com o valor do Erro, realiza-se um cálculo que é:

$$\text{Saída (Válvula)} = \text{Valor\_Anterior (Válvula)} + \text{Valor\_Calculado (Fuzzy)}$$

Na Figura 21, mostra os testes realizados com o controle fuzzy com o ganho maior com um range de -100 a 100 (ganho = 2), para um *setpoint* de 50. Nesta imagem pode-se notar que ainda continua oscilando e dessa vez com ultrapassando o valor desejado em 3 a 4 unidades de medida, porém não ficava abaixo do *setpoint* na mesma proporção. Pôde-se deduzir que o tempo de abertura da válvula era mais rápido que o tempo para fechar nessas condições de setup.

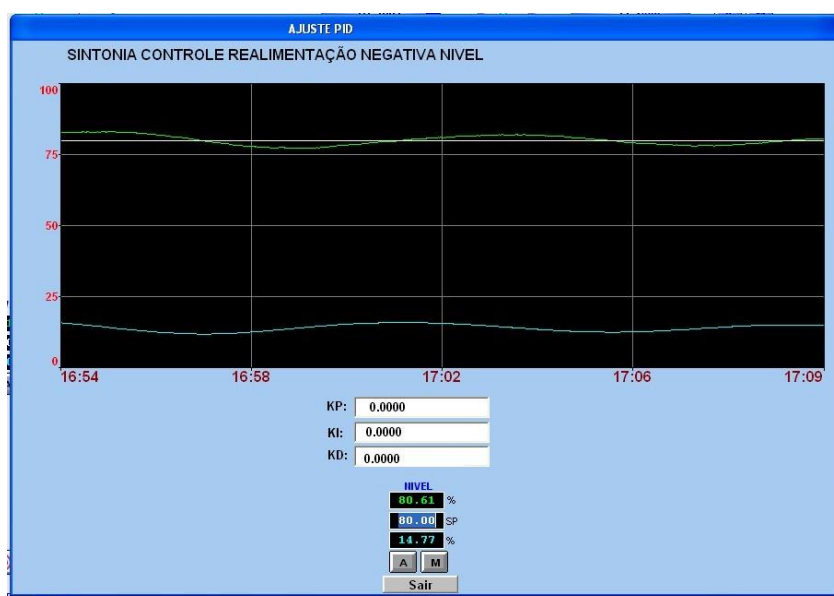
**Figura 21** - Controle Fuzzy para *Setpoint* de 50, com um range de ganho de -100 a 100 (Ganho = 2).



Fonte: Próprio Autor, 2024.

Um último teste foi realizado com o ganho menor de -25 a 25 ganho (ganho = 0,5), como mostrado na Figura 22. Observa-se que com um ganho menor, o tempo levado para alcançar o *setpoint* de 80, é mais elevado, porém foi diminuindo o ganho, que conseguiu-se alcançar o mais próximo da estabilidade para esse sistema utilizando o controle Fuzzy, mesmo que ainda se tinha uma resposta oscilatória.

**Figura 22** - Controle Fuzzy para *Setpoint* de 80, com um range de ganho de -25 a 25 (Ganho = 0,5).



Fonte: Próprio Autor, 2024

Por fim foram realizados os testes com o PID, como mostrado na Figura 23, para os *setpoint* de 80, assim como nos testes para o controle Fuzzy, utilizando também os mesmos ganhos de 1, 2 e 0.5. Em todos esses testes observou-se que no início ele tem uma resposta oscilatória, porém ele consegue buscar e manter a saída desejada. Para um controle com uma saída de maior estabilidade e menos oscilações, seria necessário atuar em todos os ganhos, Proporcional, Integral e Derivativo, porém como não era esse o foco principal do trabalho, não adentrou-se nessas tratativas.

**Figura 23** - Controle PID para *Setpoint* de 80.



Fonte: Próprio Autor, 2024

Por fim pode ser observado que o ajuste correto dos ganhos é fundamental para o desempenho do sistema de controle. Se o ganho for muito baixo, o sistema pode responder muito lentamente ou ser incapaz de alcançar o *setpoint* desejado. Por outro lado, se o ganho for muito alto, o sistema pode responder de forma muito agressiva, resultando em oscilações indesejadas ou mesmo instabilidade.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizada uma comparação entre os controladores Fuzzy e PID aplicados ao controle de nível em uma planta didática do IFTM, campus Paracatu. O objetivo foi verificar a eficiência de cada controlador em manter a saída da variável de controle próxima ou igual ao *setpoint* desejado. Durante a implementação e testes práticos, identificou-se desafios específicos e comportamentos distintos para cada tipo de controle.

O controlador Fuzzy, embora inicialmente promissor por sua capacidade de lidar com sistemas complexos e não-lineares, apresentou dificuldades para manter a saída de controle estável no *setpoint*. Observou-se uma oscilação significativa, mesmo após várias tentativas de ajustes nos parâmetros, como ganhos e mudanças de intervalos de tempo entre as atualizações do controlador. A melhor performance do controle Fuzzy ocorreu quando se diminuiu o ganho e aumentou de tempo entre as atualizações, o que resultou em um período maior de manutenção da saída desejada. No entanto, as oscilações ainda persistiram, e levava um tempo maior para alcançar o valor desejado na saída, indicando que o controlador Fuzzy necessitaria de uma calibração mais refinada ou de uma abordagem mais robusta para lidar com a dinâmica do sistema.

Por outro lado, o controlador PID demonstrou um desempenho satisfatório na manutenção da variável de controle no *setpoint*, sem apresentar oscilações significativas durante os testes realizados. Esse resultado confirma a eficácia do controlador PID em sistemas de resposta mais linear. No entanto, conforme discutido nas revisões bibliográficas e ao longo do corpo deste trabalho, sua eficácia pode ser limitada em sistemas não-lineares, o que representa uma limitação importante para aplicações mais complexas.

Dessa forma, a análise comparativa evidencia que, para a planta didática utilizada, o controlador PID atende melhor aos requisitos de estabilidade e precisão no controle de nível em condições normais de operação. Entretanto, em sistemas que apresentam não-linearidades mais acentuadas, o uso de controladores Fuzzy, ainda que necessite de aprimoramentos, pode ser uma alternativa válida, pois oferece flexibilidade para lidar com incertezas e variações dinâmicas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a análise sobre o ajuste de parâmetros dos controladores Fuzzy, possivelmente utilizando técnicas de otimização como algoritmos genéticos ou redes neurais para melhorar a sintonia dos parâmetros de controle. Além disso, seria interessante investigar controladores híbridos que combinem as vantagens dos métodos Fuzzy e PID, aproveitando a robustez do PID em condições lineares e a adaptabilidade do Fuzzy para lidar com não-linearidades, potencializando assim o desempenho no controle de nível de sistemas complexos.



## REFERÊNCIAS

ÅSTRÖM, Karl Johan; HÄGGLUND, Tore. **Advanced PID Control**. Philadelphia: ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.

ASTROM, K. J.; HAGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design, and Tuning**. Research Triangle Park: ISA, 1995.

BOLTON, W. **Programmable Logic Controllers**. 6. ed. Oxford: Elsevier, 2015.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Modern Control Systems**. 12. ed. Boston: Pearson, 2011.

EXSTO. Planta de ensaios de malhas de controle PDH-ATK 1001 com comunicação HART e sensores SMAR. 2023. Disponível em: <https://www.exsto.com/planta-controle-pdh-atk>. Acesso em: 1 set. 2024.

EXSTO Equipamentos e Sistemas de Controle Ltda. **Catálogo da Planta Didática de Ensaios de Malha de Controle PDH-ATK 1001**. Disponível em: <https://exsto.com.br/Catalogos/Plantamultiprocesso.pdf>. Acesso em: 1 set. 2024.

FERREIRA, A. **Benefícios do uso de sistemas SCADA na automação industrial**. São Paulo: Editora Técnica, 2018.

GE. **Proficy Machine Edition**. 2023. Disponível em: <https://www.quicktimeonline.com/assets/images/pdf/Ge%20Fanuc/User%20Manual%20IC200.pdf>. Acesso em: 01 set. 2024.

GUSAROVA, I. S.; SHILKINA, L. M. **Industrial Automation: Theory and Applications**. Moscou: TechBooks, 2019.

KOCIAN, L.; KOZIOREK, R.; POKORN, R. **Aplicação de Controladores Fuzzy em Sistemas Dinâmicos Não Lineares**. In: Proceedings of the International Conference on Fuzzy Systems, 2011.

MENDES, J.; SOUZA, L.; PEREIRA, R. **Automação industrial com Indusoft: Conceitos e práticas**. Rio de Janeiro: Editora Automação, 2019.

MENDL, J. M. **Fuzzy Logic Systems for Engineering: Theory and Applications**. Prentice Hall, 2017.

MINIPA do Brasil Ltda. **Exemplo de programação em linguagem de Diagrama Ladder (LAD)**. 2017.

MOÇAMBIQUE. **Aplicações da Lógica Fuzzy em Sistemas Fotovoltaicos**. 2012.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OLIVEIRA, C.; COSTA, M. **Indústria 4.0: Conectividade e integração com sistemas SCADA**. Porto Alegre: Editora Inovação, 2021.

PÉREZ, J.; GODOY, M.; GODOY, L. Lógica Fuzzy para Controle de Sistemas Complexos. **Revista de Automação e Controle**, v. 10, n. 2, p. 123-135, 2014.

PETRUZELLA, F. D. **Electric Motors and Control Systems**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

ROCHA, L. S. **Implementação de controlador Fuzzy em CLP de pequeno porte utilizando lógica Ladder**. Paracatu, 2023.

ROSS, Timothy J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2010.

SILVA, A. M.; MENEZES, F. A. **Controladores Lógicos Programáveis: Teoria e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Editora Érica, 2008.

SILVA, F. **SCADA e IHMs: Aplicações práticas com Indusoft Web Studio**. Belo Horizonte: Editora Industrial, 2020.

SILVA, José da. **Lógica Fuzzy: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Editora Acadêmica, 2011.

SOUSA, S. M.; AGUIAR, J. V. C.; ROCHA, L. S. **Adaptação de Bloco Fuzzy para Controle de Nível**. Projeto de Pesquisa. Edital 13/2022. Instituto Federal do Triângulo Mineiro, Campus Paracatu, 2022.

SUGENO, Michio. **Industrial Applications of Fuzzy Control**. Amsterdam: North- Holland, 1985.

WANG, Li-Xin. **A Course in Fuzzy Systems and Control**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997.

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