



Artigo

Análise comparativa dos controladores PID e PID-Fuzzy aplicados na regulação de velocidade de um motor CC

João Pedro Pereira Barbosa ^[1], Dartiu Rafael Dantas da Silva Alves ^[2], Geronimo Barbosa Alexandre ^[3]

^[1] Instituto Federal da Paraíba; Graduando em Engenharia de Controle e Automação; joao-barbosa.jb@academico.ifpb.edu.br

^[2] Instituto Federal da Paraíba; Graduando em Engenharia de Controle e Automação; dartiu.rafael@academico.ifpb.edu.br

^[3] Instituto Federal da Paraíba; Prof. EBTT; M. Sc. Engenharia Elétrica; geronimo.alexandre@ifpb.edu.br

Recebido: 21 /06/2026;

Aceito: 27/06/2026;

Publicado: 15/07/2026;

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma bancada didática experimental voltada para a análise comparativa do desempenho dos controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID) clássico e PID-Fuzzy na regulação de velocidade de um motor de corrente contínua (CC) com *encoder*. Como principais contribuições tecnológicas, a estrutura física utiliza o microcontrolador ESP32 integrado ao *software* Elipse E3 como sistema supervisor SCADA, permitindo o monitoramento gráfico e o ajuste paramétrico em tempo real. A modelagem do motor foi identificada em malha aberta e aproximada por um sistema de primeira ordem com tempo morto. Os controladores foram validados experimentalmente sob um degrau de referência de 50 RPM. Os resultados numéricos revelaram que ambas as estratégias apresentaram o mesmo tempo de subida (0,25 s). Contudo, o PID clássico demonstrou superioridade de desempenho temporal e de erro ao obter menor sobressinal (24,7% contra 39,1% do PID-Fuzzy), menor tempo de acomodação (0,65 s) e menor erro em regime permanente (1,0 RPM contra 3,9 RPM do PID-Fuzzy). Enquanto o PID clássico alcançou convergência assintótica, a abordagem Fuzzy apresentou um comportamento transiente oscilatório sustentado ao redor do *setpoint* devido à alta sensibilidade de suas regras heurísticas. Conclui-se que o controlador PID tradicional consolidou-se como a solução mais eficiente, estável e precisa para a planta analisada, minimizando o desgaste mecânico do atuador.

Palavras-chave: motor CC; sintonia de controladores; PID clássico; controle Fuzzy; regulação de velocidade.

Comparative analysis of PID and PID-Fuzzy controllers applied to DC motor speed regulation

Abstract: This paper presents the development of an experimental teaching bench aimed at a comparative performance analysis of classical Proportional-Integral-Derivative (PID) and PID-Fuzzy controllers in the speed regulation of an encoder-equipped direct current (DC) motor. As main technological contributions, the physical structure utilizes the ESP32 microcontroller integrated with Elipse E3 software as a SCADA supervisory system, enabling real-time graphical monitoring and parametric adjustments. The motor modeling was identified in openloop and approximated by a first-order plus dead time system. The controllers were experimentally validated under a 50 RPM reference step input. The numerical results revealed that both strategies achieved the same rise time (0.25 s). However, the classical PID demonstrated superior temporal and error performance by obtaining a lower overshoot (24.7% versus 39.1% for the PID-Fuzzy), a shorter settling time (0.65 s), and a smaller steady-state error (1.0 RPM versus 3.9 RPM for the PID-Fuzzy). While the classical PID achieved asymptotic convergence, the Fuzzy approach exhibited a sustained oscillatory transient behavior around the setpoint due to the high sensitivity of its heuristic rules. In conclusion, the traditional PID controller proved to be the most efficient, stable, and accurate solution for the analyzed plant, minimizing the mechanical wear on the actuator.

Keywords: DC motor, controller tuning, classic PID, Fuzzy control, speed regulation.

1. INTRODUÇÃO

O controle de velocidade de motores de corrente contínua (CC) é um tema central na engenharia, abrangendo desde aplicações industriais até sistemas didáticos de precisão [1]. A literatura técnica apresenta uma evolução constante nas estratégias de controle, partindo do tradicional Proporcional-Integral-Derivativo (PID) para abordagens híbridas e inteligentes, como o PID-Fuzzy, visando lidar com as não linearidades inerentes a esses sistemas.

Trabalhos recentes destacam essa transição, [2] e [3] realizam comparações diretas entre o PID clássico e o PID-Fuzzy, evidenciando como a lógica nebulosa pode melhorar o tempo de resposta e a robustez.

Em [4] avançam na otimização ao aplicar algoritmos genéticos para sintonizar um controlador PID-Fuzzy adaptativo em motores CC didáticos. No trabalho [5], os autores demonstram a aplicação prática dessas técnicas em veículos guiados automatizados, utilizando motores com *encoder* para garantir a precisão de movimento.

Neste contexto, o presente trabalho diferencia-se ao realizar uma análise comparativa experimental do desempenho em malha fechada entre o controle PID tradicional e o PID-Fuzzy, especificamente aplicados a um motor CC com *encoder*. Diferente de abordagens baseadas exclusivamente em simulação ou plataformas como Arduino Uno, esta pesquisa utiliza a ESP32, um microcontrolador de maior poder de processamento, integrado a uma ponte H para o acionamento.

A inovação do Trabalho inclui o uso do *software* Elipse E3 como sistema de comando / supervisão. Esta *interface* permite não apenas a visualização em tempo real de gráficos de velocidade (medida versus *setpoint*), mas também a interação dinâmica com o processo através da alteração de ganhos e pontos de ajuste diretamente na tela.

Por fim, a avaliação do sistema é conduzida sob duas perspectivas críticas: (a) análise de desempenho na ótica temporal (tempo de subida, *overshoot* e tempo de estabelecimento); (b) análise de desempenho na ótica do erro: utilização de métricas integrais como ISE (*Integral of Squared Error*) e IAE (*Integral of Absolute Error*) para quantificar a precisão e a estabilidade de cada estratégia de controle.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados a metodologia usada no trabalho, os materiais usados para a confecção do protótipo didático, o diagrama elétrico dos sensores e atuadores a ESP32, o experimento de modelagem do processo e os métodos de sintonia das estratégias de controle usadas na regulação da velocidade do motor CC.

2.1. Metodologia Adotada

A metodologia usada foi estruturada para garantir a validade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos no controle de velocidade do motor CC. Segundo [6], a pesquisa pode ser definida como um processo pragmático de resolução de problemas, que neste caso se materializa na busca por um controle de velocidade mais eficiente através da comparação entre as técnicas PID e PID-Fuzzy.

O estudo assume um caráter inicial exploratório, visto que busca familiarizar o pesquisador com as nuances das não-linearidades do motor e o comportamento da lógica Fuzzy aplicada ao *hardware* ESP32. Como aponta [7], a pesquisa exploratória tem como objetivo principal o aprimoramento de ideias.

Simultaneamente, a pesquisa é descritiva, pois registra e analisa as características do sistema em malha fechada sem manipulá-las arbitrariamente, mas sim observando o comportamento das variáveis sob a influência dos controladores sintonizados. A descrição detalhada do funcionamento do sistema supervisor Elipse E3 e a resposta do motor frente aos degraus de velocidade cumprem o papel de expor as variáveis do fenômeno estudado.

A investigação adota uma abordagem mista (quali-quantitativa). A vertente quantitativa é evidenciada pela coleta de dados numéricos provenientes do *encoder* e processados na ESP32, permitindo o cálculo matemático dos índices de desempenho. Conforme [8], o método quantitativo é caracterizado pelo emprego de instrumentos estatísticos para garantir a precisão das conclusões e evitar distorções de interpretação.

Por outro lado, a abordagem qualitativa manifesta-se na análise interpretativa dos gráficos e na avaliação da usabilidade e eficiência da interface de supervisão. Segundo [9], a pesquisa qualitativa permite que o pesquisador compreenda o contexto do fenômeno — neste caso, como a *interface* homem-máquina (IHM) facilita o ajuste fino dos parâmetros de controle e a percepção visual do comportamento dinâmico do motor.

O trabalho caracteriza-se também como uma pesquisa tecnológica, resultando na apresentação de um produto: uma bancada de controle integrada. De acordo com [10], o desenvolvimento de um artefato técnico como parte de uma pesquisa acadêmica exige que as etapas de projeto, montagem e teste sejam rigorosamente documentadas. As ações obedeceram a um fluxo lógico de etapas:

- (a) Fundamentação Teórica: Estudo dos algoritmos de controle e bibliografia atualizada.
- (b) Desenvolvimento do Protótipo: Integração entre ESP32, Ponte H e motor com *encoder*.
- (c) Implementação do controle: Programação lógica das estratégias de controle propostas em linguagem C e verificação da resposta temporal.
- (d) Implementação de *software*: Programação lógica e desenvolvimento da aplicação SCADA no Elipse E3.
- (e) Coleta e Análise de Dados: Testes experimentais comparando as métricas temporais e de erro.

2.2. Materiais Usados e Diagrama Elétrico

Os materiais utilizados para confecção do protótipo experimental estão dispostos na Tabela 1. O protótipo experimental apresentou um custo de R\$ 183,00

TABELA 1. Materiais utilizados no protótipo e orçamento.

Material	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$) *
ESP32 + Cabo micro USB	1	68,00	68,00
Fios e cabos	-	10,00	10,00
Motor CC com <i>encoder</i>	1	79,00	79,00
Base para o motor	1	5,00	5,00
Disco para o motor	1	2,00	2,00
Driver motor Ponte H	1	19,00	19,00
Preço Total	-	-	183,00

*Cotação feita em 2026.

A bancada didática é composta de três partes: o atuador (a ponte H), o sensor de velocidade (*encoder* rotativo) e o controle implementado no microcontrolador ESP32 da Espressif Systems.

O sinal de realimentação do *encoder* rotativo é usado para determinar o erro entre a velocidade de referência e a velocidade real do motor. O controlador PID regula a tensão fornecida ao motor usando o sinal PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*) para atingir a saída desejada.

A modulação por largura de pulsos (PWM) é usada para controlar a tensão aplicada ao *driver* ponte H dupla (L298N), este *driver* consegue controlar independentemente a velocidade e rotação de dois motores CC ou um motor de passo, com tensão de operação de 6 a 35V, com corrente máxima de operação de 2A por canal, com um limite total de até 4A.

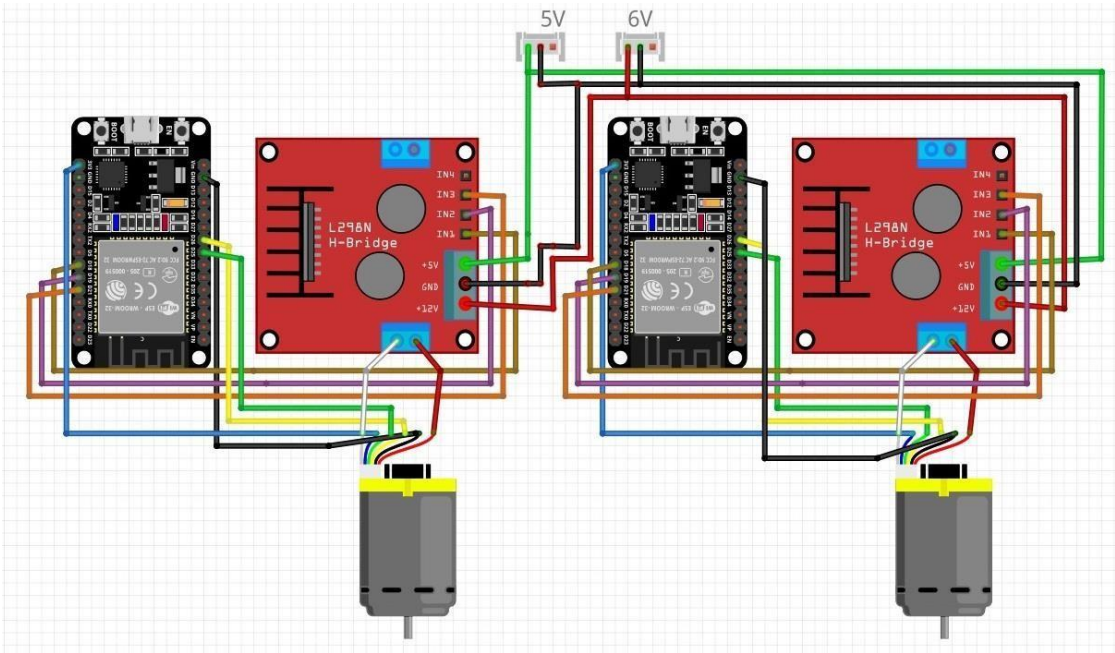


FIGURA 1. Diagrama de ligação dos sensores e atuadores ao microcontrolador ESP32.

Na Figura 1 é ilustrado o diagrama de ligação elétrica dos componentes usados na montagem. Os pinos 25 e 26 são os pinos externos usados na função de interrupção, que são disparadas pelos pulsos do *encoder* rotativo. O pino 18 é o pino PWM para controlar a tensão fornecida ao *driver* do motor (ponte H). Os pinos 25 e 26 são

usados para alterar a direção do motor, alterando a polaridade da tensão de alimentação para o motor. A Tabela 2 ilustra o diagrama de pinagem da ESP32 usado na prática experimental.

TABELA 2. Diagrama de pinagem da ESP32 usada na montagem experimental.

Descrição	Pino	Funcionalidade
Encoder A	19	Medição de velocidade e posição
Encoder B	21	Medição de velocidade e posição
Sinal PWM	18	Sinal PWM que será enviado à ponte H
Entrada de interrupção 1	26	Sinal usado para controle de direção
Entrada de interrupção 2	25	Sinal usado para controle de direção

2.3. Diagrama Elétrico e Lógica de Programação do CLP FX3U

A dinâmica do sistema foi modelada utilizando o método da curva de reação. Aplicou-se um degrau de tensão de 6V (variável manipulada) e o motor começou a girar livremente até atingir a estabilização em 200 RPM.

A resposta temporal do nível (variável de processo) foi registrada para a extração dos parâmetros do modelo de primeira ordem com tempo morto (atraso), conforme [11] e [12], sendo definido pela Equação (1).

$$G(s) = \frac{\Delta Y(s)}{\Delta U(s)} = \frac{K \cdot e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

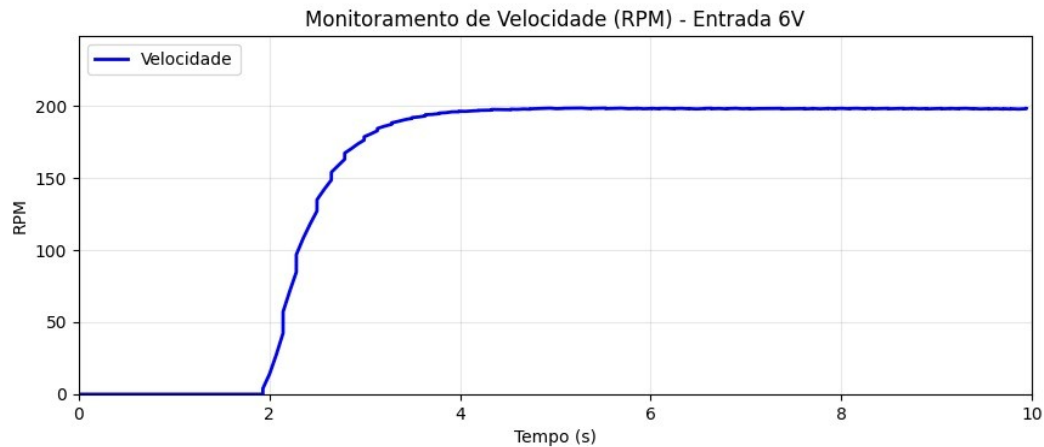


FIGURA 2. Resposta da velocidade ao degrau de tensão de 6V.

Os parâmetros obtidos a partir da inspeção da Figura 2, foram: ganho estacionário ($K = 200/6 = 33,33$ RPM/V), constante de tempo ($\tau = 0,5$ s) e atraso de transporte ($\theta = 1,9$ s).

Substituindo os valores dos parâmetros na equação (1), temos o modelo que descreve a dinâmica da planta,

$$G(s) = \frac{33,33 \cdot e^{-1,9s}}{0,5s + 1} \quad (2)$$

Normalizando o termo do denominador, multiplicando o numerador e o denominador por 2 para eliminar o decimal do termo “s”, a função de transferência pode ser escrita como:

$$G(s) = \frac{66,66 \cdot e^{-1,9s}}{s + 2} \quad (3) \text{ s}$$

Da equação (3), percebe-se que o modelo da planta apresenta um polo em $s=-2$ e ganho direto de 66,66 RPM/V.

2.4. Sintonia do Controlador PID tradicional

Na Figura 3 é ilustrada o diagrama de blocos da malha fechada usando o controlador PID clássico, cujo objetivo da sintonia é determinar os ganhos proporcional, integral e derivativo que levam a uma resposta estável e com erro nulo em regime permanente, atendendo aos requisitos de projeto.

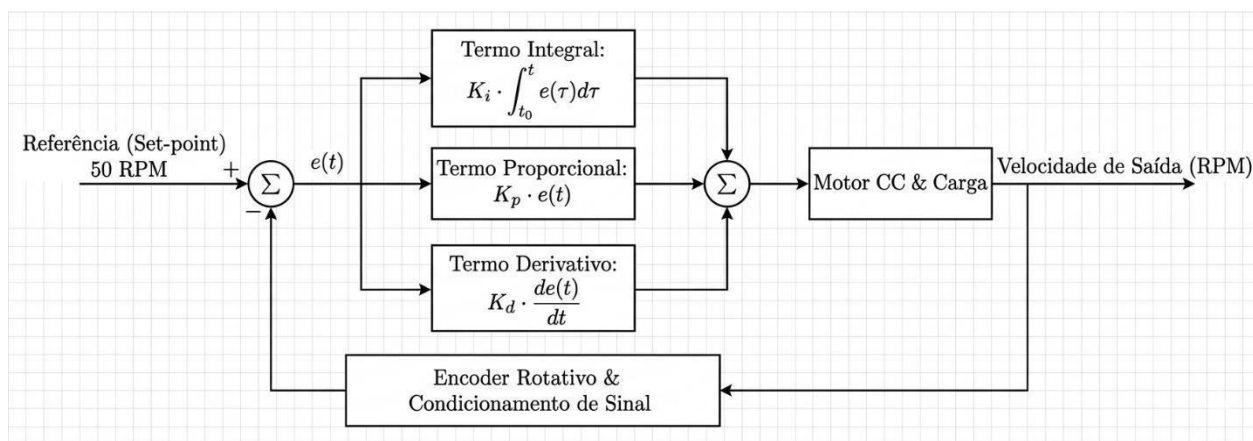


FIGURA 3. Diagrama de blocos para o controle PID tradicional.

Para a sintonia inicial do controlador PID tradicional foi usado os métodos de Cohen-Coon, Ziegler-Nichols de primeira ordem (Malha Aberta ou curva de reação) e Ziegler-Nichols de segunda Ordem (ou Método da Sensibilidade Crítica). A Tabela 3 apresenta o comparativo dos métodos sintonia.

TABELA 3. Comparativo dos métodos de sintonia.

Parâmetro	ZN (1ª Ordem)	Cohen-Coon	ZN (2ª Ordem)
K_P	0,0095	0,0180	0,0199
K_I	0,0025	0,0075	0,0059
K_D	0,0090	0,0074	0,0167

Como a planta apresenta um atraso dominante ($\theta = 1,9 \text{ s} > \tau = 0,5 \text{ s}$), o ganho proporcional de ZieglerNichols – 1ª ordem ($K_P = 0,0095$) acabou ficando bem mais conservador (metade) do que o de Cohen-Coon ($K_P = 0,018$). Isso significa que a resposta com Ziegler-Nichols tenderá a ser mais lenta para alcançar o *setpoint* de 50 RPM, mas apresentará menos oscilação inicial.

Nota-se que o Método do Relé (ZN 2ª ordem) resultou em um ganho derivativo ($K_D = 0,0167$) significativamente maior do que os outros métodos. Como o sistema possui um tempo morto agressivo, esse componente derivativo mais alto ajudará a "prever" a forte subida da curva após o atraso, agindo como um amortecedor para diminuir o sobressinal (*overshoot*) que sintonias puras de malha aberta costumam causar nesse tipo de planta.

Adiante, os ganhos do controlador obtidos pelo método do relé foram inseridos no código do microcontrolador para realizar a implementação prática, a partir da resposta temporal, os ganhos foram ajustados na tela do SCADA, para uma melhor estabilidade e erro próximo a zero, obtendo os seguintes valores finais: $K_P = 0,8$; $K_I = 0,3$ e $K_D = 0,02$. Estes valores finais serviram para definir a faixa operacional dos valores das funções de pertinências dos ganhos no controle PID-Fuzzy.

2.5. Sintonia do Controlador PID-Fuzzy

A estrutura do controlador PID-Fuzzy fundamenta-se na integração da lógica Fuzzy ao algoritmo PID, visando a sintonização automática e *on-line* de seus parâmetros. Segundo [13], essa arquitetura permite que o sistema se adapte dinamicamente a variações na carga ou alterações na dinâmica da planta, uma vez que os ganhos do PID são recalculados em tempo real pela inteligência Fuzzy para compensar tais perturbações.

O sistema Fuzzy é composto de três etapas: (a) Fuzzyficação, (b) Base de regras e (c) Defuzzyficação. O sistema projetado possui duas entradas (o erro e a derivada do erro) e três saídas (K_P , K_I e K_D). Na Figura 4 é ilustrada o diagrama de blocos do controlador PID baseado em lógica Fuzzy.

As funções de pertinência (entrada e saída) estão dispostas nas Figuras 5 e 6, onde foram usadas duas funções trapezoidal e uma função triangular, tomando como base o estudo de [14].

O mapeamento (Figura 6) do valor do ganho proporcional (variação entre 0,0 a 2,0 unidades) foi: Pequeno - Trapezoidal (0,0; 0,2; 0,5), Médio - Triangular (0,3; 0,6; 0,9) e Grande - Trapezoidal (0,8; 1,0; 2,0). O ganho integral variou de 0,0 a 1,0 unidade, sendo: Pequeno (0,0; 0,15; 0,3), Médio (0,2; 0,6; 0,9) e Grande (0,85; 1,0; 1,20). Por fim o ganho derivativo variou no intervalo de 0,0 a 0,12, sendo: Pequeno (0,0; 0,02; 0,04), Médio (0,02; 0,05; 0,0,8) e Grande (0,075; 0,1; 0,12).

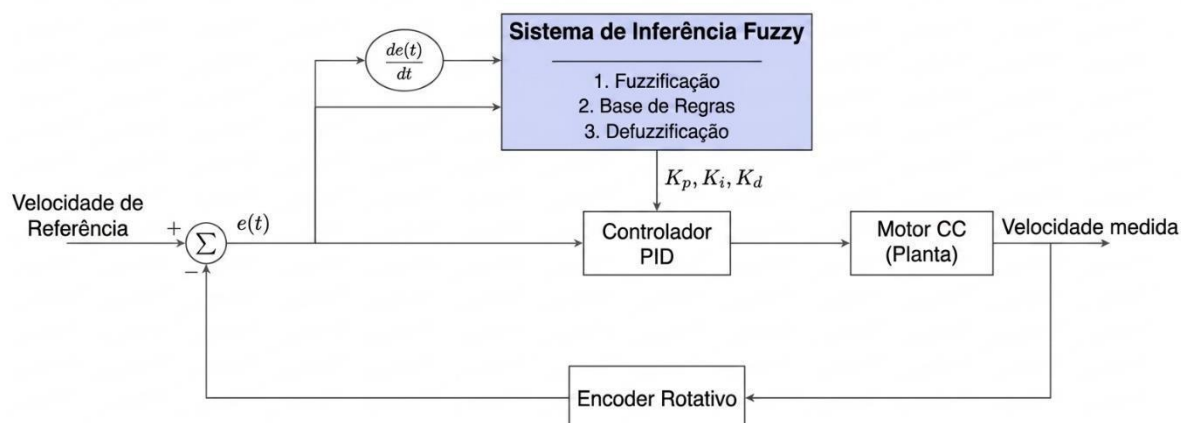


FIGURA 4. Controlador PID baseado em lógica Fuzzy.

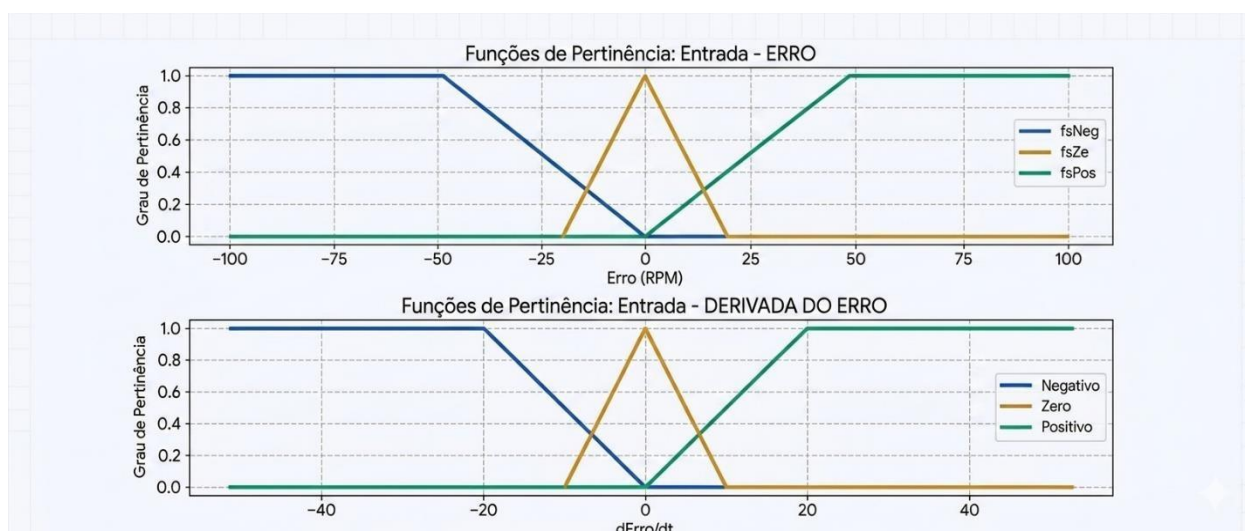


FIGURA 5. Funções de pertinência para as entradas.

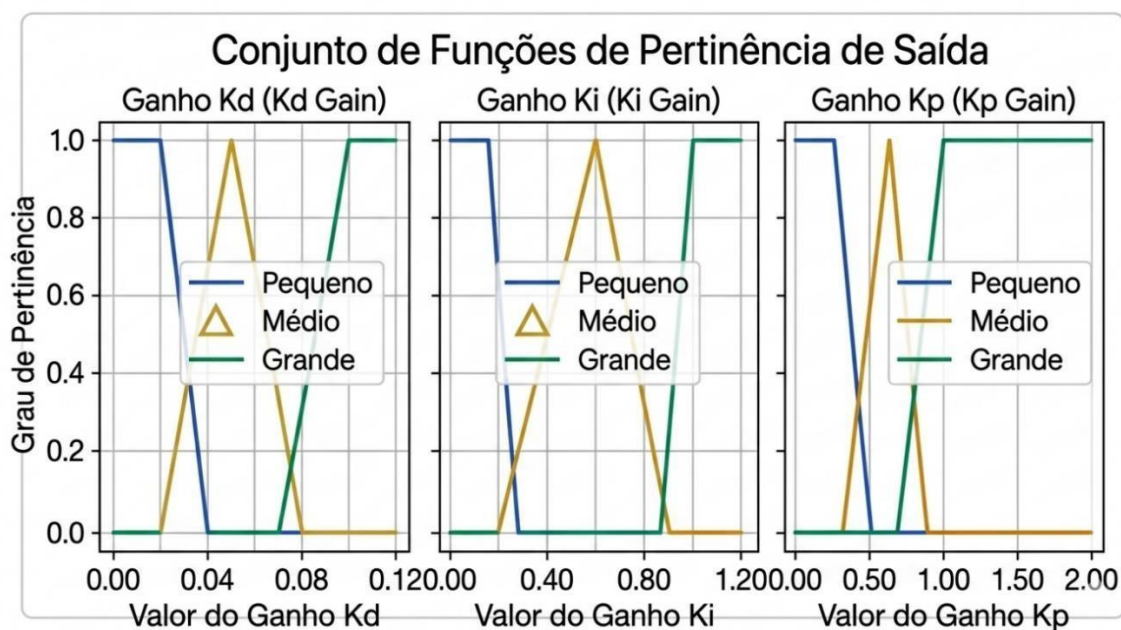


FIGURA 6. Funções de pertinência para as saídas.

3. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os detalhes físicos do protótipo confeccionado, o SCADA local que faz a gestão do processo (comando e supervisão) e os resultados experimentais das estratégias de controle na regulação da velocidade do motor CC.

3.1. Descrição da bancada Didática Experimental

A validação experimental das estratégias propostas neste trabalho foi conduzida em uma bancada didática multifuncional (Figura 7), projetada para o estudo integrado de sistemas de controle, redes industriais e sistemas supervisórios dentro do paradigma da Indústria 4.0.

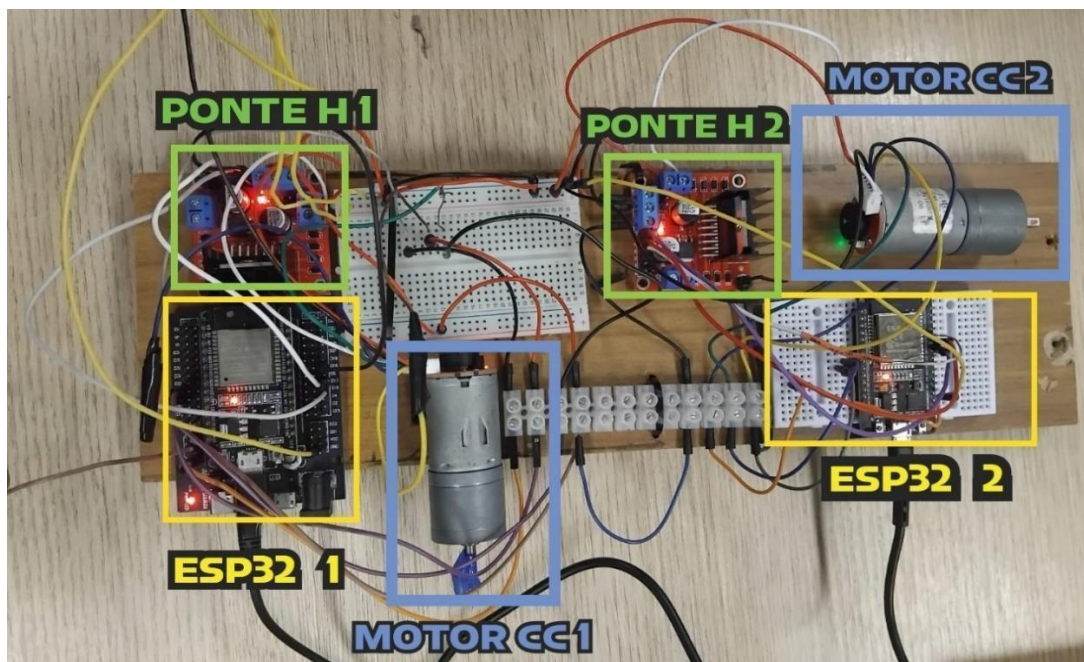


FIGURA 7. Detalhes da bancada de controle de velocidade.

A arquitetura física e de *hardware* da bancada é composta por três camadas principais:

- Camada de Atuação e Potência: Constituída por dois motores de corrente contínua (CC) independentes, acionados por *drivers* de potência do tipo Ponte H (L298N). O sistema permite o controle bidirecional e a variação de velocidade via Modulação por Largura de Pulso (PWM). Para o controle em malha fechada, os motores dispõem de um *encoder* de quadratura acoplado, viabilizando a leitura de velocidade e posição angular em tempo real para a implementação de algoritmos de controle.
- Camada de Processamento e Conectividade: Centralizada em dois microcontroladores ESP32 operando de forma distribuída. Esta configuração permite emular arquiteturas de redes industriais modernas, especificamente voltadas para a *Internet* das Coisas Industrial. Os módulos são capazes de estabelecer comunicação mestre-escravo, implementar protocolos baseados em TCP/IP (como o Modbus TCP) e protocolos de transporte de mensagens leves (como o MQTT), simulando cenários reais de borda e comunicação em nuvem.
- Camada de Supervisão (SCADA): Viabilizada pela *interface* de rede nativa dos controladores, a qual permite a exportação de variáveis de processo (como RPM, corrente e erros de regime) para plataformas de monitoramento e *interfaces* homem-máquina (IHM). O arranjo viabiliza a integração com sistemas supervisórios locais ou em nuvem (Node-RED, ScadaBR ou plataformas comerciais), permitindo a coleta de dados, a análise de curvas dinâmicas e o comando remoto dos atuadores.

A infraestrutura física adota conexões robustas via barras de bornes para a distribuição de potência, minimizando ruídos elétricos e garantindo a repetibilidade dos ensaios de controle e comunicação.

3.2. Interface SCADA de Comando e Supervisão

Além da lógica de controle na ESP32, foi desenvolvido o sistema de supervisão e operação local. A plataforma utilizada foi o *software* Elipse E3, que atua como mestre da rede *modbus*.

A *interface* homem-máquina desenvolvida em plataforma SCADA (Elipse E3) para o monitoramento do controlador PID é apresentada na Figura 8. O ambiente virtual foi estruturado em dois módulos complementares: controle paramétrico e monitoramento gráfico. No painel de controle (à esquerda), o usuário pode realizar o ajuste dos ganhos proporcional, integral e derivativo em tempo real, além de estipular o *setpoint* de velocidade e comandar a inicialização do motor.

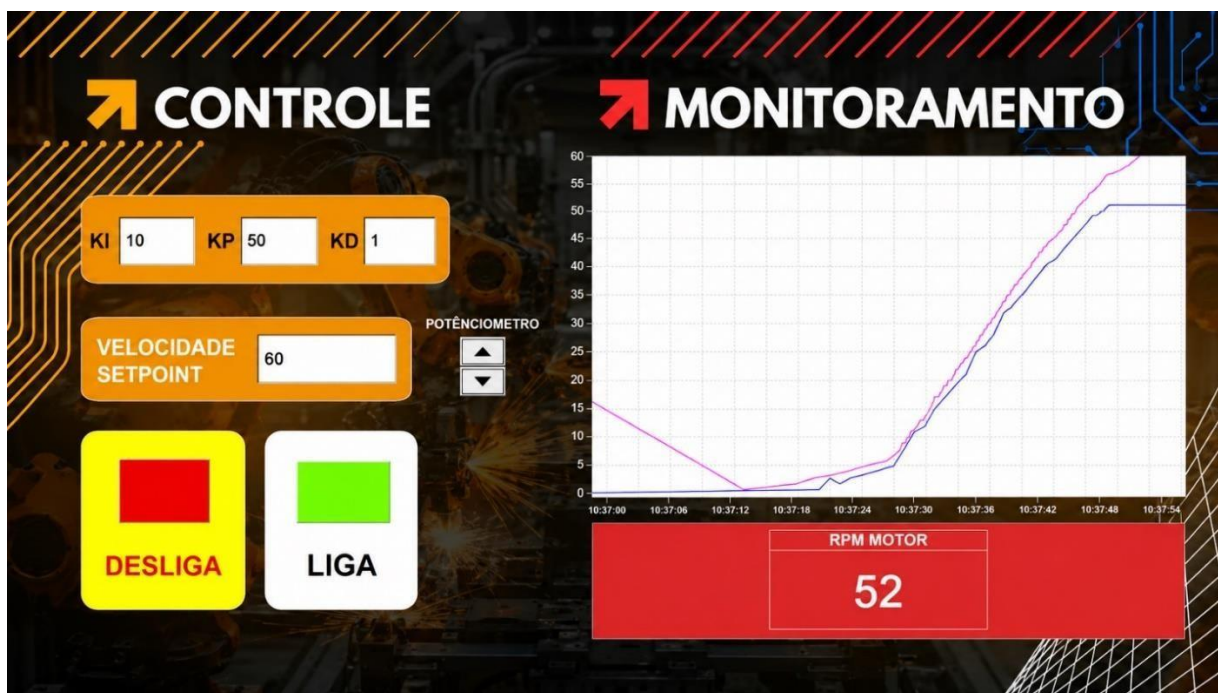


FIGURA 8. Tela do SCADA para o controle PID clássico.

O módulo de monitoramento (à direita) integra um gráfico de tendências temporais e um registrador numérico digital da velocidade angular do motor (RPM). A resposta temporal exibida na tela ratifica a estabilidade do controlador PID configurado com os parâmetros $K_P=50$, $K_I=10$ e $K_D=1$. O rastreamento da referência (ajustada em 60 RPM) ocorre por meio de um transiente suave e sem a presença de oscilações destrutivas (*overshoot* acentuado), validando a eficiência da comunicação de dados via rede industrial entre o controlador de borda (ESP32) e o sistema supervisão executado na estação de engenharia.

A interface SCADA adaptada para a estratégia de controle inteligente Fuzzy é ilustrada na Figura 9. O painel de controle foi modificado para permitir a manipulação em tempo real dos fatores de escalonamento da inferência Fuzzy: ganho do erro ($GE=40$), ganho da variação do erro ($GDE=40$) e ganho de saída da ação de controle ($GU=10$). Adicionalmente, inseriu-se um integrador numérico (ERRO ABS) destinado ao cálculo do Erro Absoluto Acumulado (IAE), fornecendo uma métrica direta de desempenho energético e de precisão do sistema.

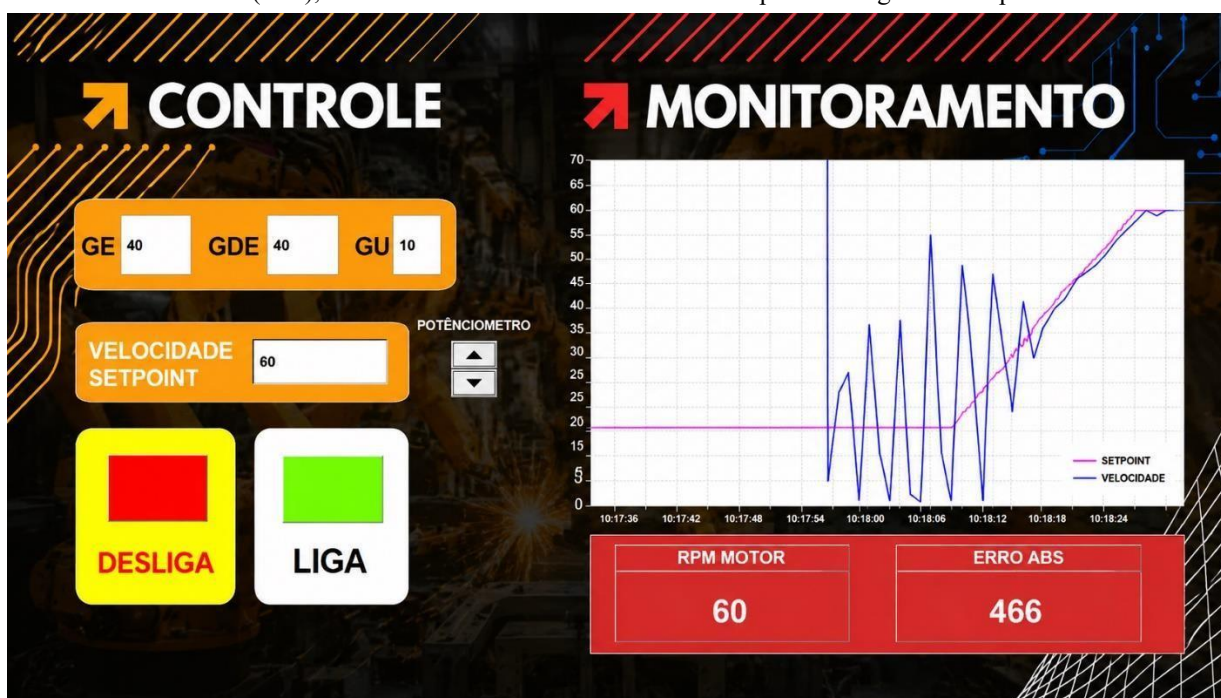


FIGURA 9. Tela do SCADA para o controle PID-Fuzzy.

O gráfico de tendências temporais registra um comportamento dinâmico complexo, típico de sistemas não lineares adaptativos. Inicialmente, observa-se um regime transiente de forte oscilação (entre os instantes 10:17:54 e 10:18:12), decorrente da alta sensibilidade das regras de inferência frente às condições de contorno iniciais da

planta. No entanto, após o período de acomodação transitória, o controlador mitiga o efeito de chaveamento, convergindo a variável de processo (RPM) de forma linear e síncrona com a referência até o completo anulação do erro em regime permanente para o setpoint de 60 RPM. O elevado valor final registrado no display de erro absoluto (466) decorre majoritariamente da severidade desse transiente inicial, servindo como parâmetro comparativo frente ao controle linear clássico.

3.3. Resultados Experimentais das Estratégias de Controle Propostas

O experimento de validação do controle PID tradicional versus o PID-Fuzzy na gestão da velocidade ocorreu no dia 14/05/2026, os dados mensurados foram exportados e plotados na *interface* de monitoramento SCADA desenvolvida.

Na Figura 10 é possível ver o comportamento da ação dos controladores, com a saída seguindo a referência de controle para um degrau de velocidade de 50 RPM.

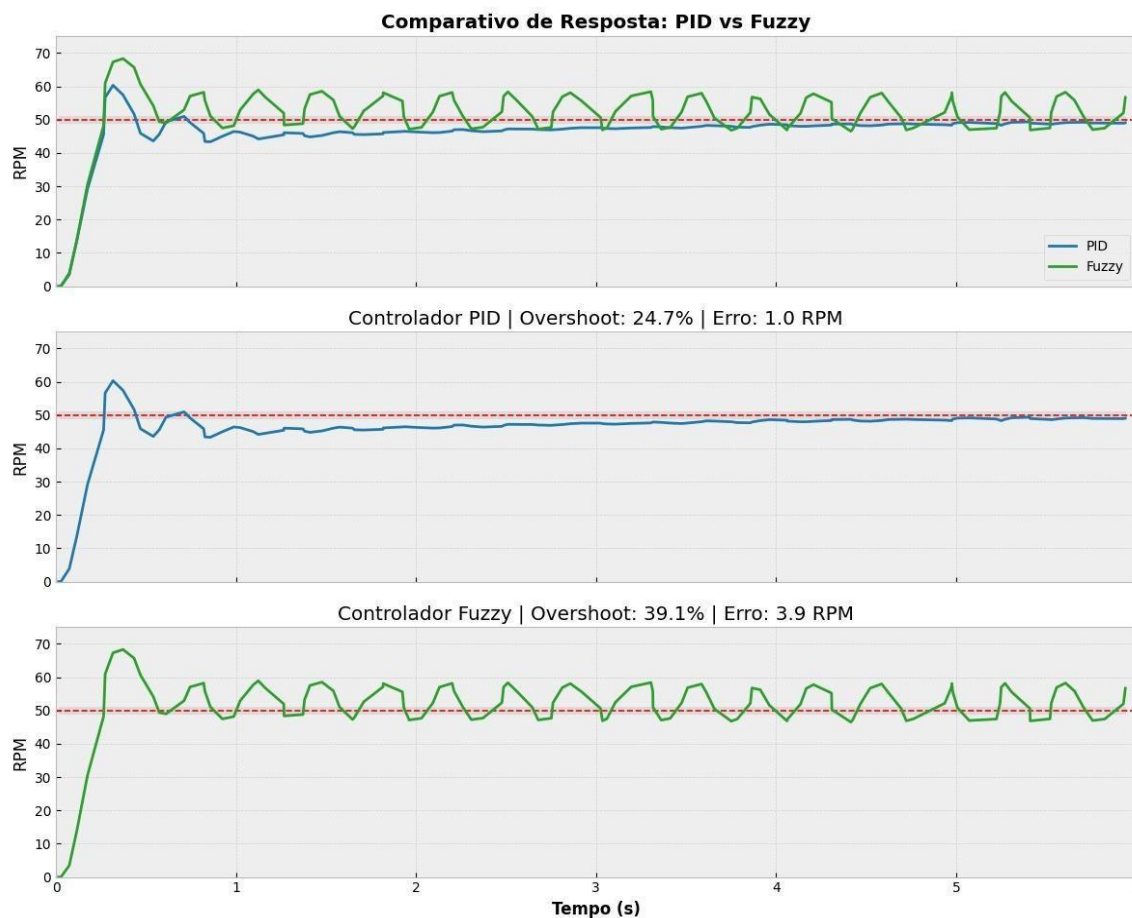


FIGURA 10. Resposta das estratégias de controle PID e PID-Fuzzy.

Percebe-se que o sistema é estável e bem comportado em malha fechada, mostrando que as estratégias de controle conseguem levar a saída controlada a seguir a referência de controle, com erro em regime permanente próximo de zero.

A Tabela 4 foi organizada para apresentar os valores dos parâmetros de desempenho dos controles PID clássico e PID-Fuzzy frente ao *setpoint* de velocidade de 50 RPM.

TABELA 4. Dados de desempenho e robustez das estratégias de controle.

Parâmetro	PID Tradicional	PID-Fuzzy	Diagnóstico
Tempo de subida	0,25s	0,25s	Empate (Mesma dinâmica)
Tempo de acomodação	0,65s	Oscilatório	PID (Evita desgaste do atuador)
<i>Overshoot</i>	24,7%	39,1%	PID (Menor impacto mecânico)
Valor do pico	62,3 RPM	69,5 RPM	Empate (Mesma dinâmica)
Erro em regime permanente	1,0 RPM	3,9 RPM	PID (Precisão estatística)

Observando a etapa de regime permanente (Tabela 4), o PID atinge a estabilidade assintótica clássica, com uma pequena banda de erro (1 RPM). Já o Fuzzy estabelece uma oscilação sustentada de amplitude e frequência constantes ao redor da referência. Esse comportamento indica que o mapeamento de regras heurísticas do Fuzzy criou uma zona de ganho excessivo próxima ao erro zero, impedindo o sistema de repousar e gerando vibração contínua no motor CC.

Partindo do comparativo do desempenho na ótica do tempo, percebe-se que o controlador PID-clássico apresentou desempenho temporal superior, sendo a escolha ideal para garantir estabilidade, menor desgaste do atuador e precisão em regime permanente.

A análise dos controladores sob a ótica do erro de rastreamento da referência, evidencia a superioridade da estrutura clássica linear (PID) sobre a abordagem heurística (Fuzzy) para a planta em questão. O controlador PID demonstrou convergência assintótica do erro, mitigando as oscilações transitórias após 1,0 s e consolidando um erro em regime permanente de apenas 1,0 RPM. Esse comportamento denota a correta sintonia da ação integral, capaz de anular os efeitos de perdas estáticas e atritos do motor CC.

Em contrapartida, o controlador Fuzzy apresentou desempenho limitado no estado estacionário, caracterizado por um regime de oscilação sustentada (ciclo limite). O erro dinâmico do Fuzzy oscila de forma contínua em uma banda que varia de +3 RPM a -8 RPM, resultando em um erro médio de regime de 3,9 RPM. Esse comportamento infere que as funções de pertinência ou as regras de inferência adotadas criaram uma região de alta sensibilidade ao redor do *setpoint*, gerando um efeito de chaveamento que impede a acomodação do erro na origem. Consequentemente, os índices cumulativos de erro absoluto (IAE) e quadrático (ISE) do controlador Fuzzy são superiores, implicando em maior desgaste mecânico do atuador e menor precisão de rastreamento.

4. CONCLUSÃO

A bancada experimental desenvolvida demonstrou ser uma plataforma eficiente para estudos didáticos e experimentais em automação, controle de processos e sistemas supervisórios, permitindo a integração entre sensores, atuadores, algoritmos inteligentes e comunicação industrial em tempo real.

Os resultados experimentais evidenciaram que ambas as estratégias foram capazes de estabilizar o sistema e realizar o rastreamento da referência de velocidade. Entretanto, o controlador PID clássico apresentou desempenho superior sob a ótica temporal e de erro, alcançando menor *overshoot*, menor tempo de acomodação e menor erro em regime permanente. A resposta do PID mostrou-se mais estável e adequada para aplicações que exigem precisão, robustez e menor desgaste mecânico do atuador.

Por outro lado, o controlador PID-Fuzzy apresentou maior sensibilidade dinâmica e comportamento adaptativo frente às variações do processo. Apesar disso, as funções de pertinência e as regras de inferência adotadas ocasionaram oscilações sustentadas próximas ao *setpoint*, resultando em maior erro acumulado e maior instabilidade em regime permanente. Ainda assim, a estratégia demonstrou potencial para aplicações em sistemas não lineares e sujeitos a perturbações, especialmente quando associada a técnicas mais avançadas de otimização e sintonia automática.

Outro ponto relevante do trabalho foi o desenvolvimento da *interface* supervisória no Elipse E3, que possibilitou o monitoramento gráfico em tempo real, ajuste dinâmico dos parâmetros de controle e aquisição das variáveis do processo, contribuindo significativamente para a análise experimental e para a interação homemmáquina.

Dessa forma, conclui-se que o controlador PID tradicional foi a solução mais eficiente para a planta analisada nas condições experimentais adotadas. Contudo, o controle PID-Fuzzy mostrou-se uma alternativa promissora, principalmente para pesquisas futuras envolvendo sistemas com maior grau de não linearidade, adaptação automática de ganhos e técnicas híbridas de inteligência computacional.

Como trabalhos futuros, sugere-se: (a) otimização automática das regras Fuzzy por algoritmos genéticos; (b) aplicação de redes neurais para autoajuste dos ganhos; (c) implementação de controle adaptativo em tempo real; (d) integração com plataformas de computação em nuvem; (e) análise energética do sistema sob diferentes estratégias de controle.

AGRADECIMENTOS

Ao IF Sertão PB Campus Cajazeiras pela disponibilização da estrutura laboratorial durante a condução dos testes de validação da bancada didática.

REFERÊNCIAS

- [1] SILVA, F. N., SOUZA, G. S., ALEXANDRE, G. B. Análise do controle PID aplicado no controle de velocidade de um motor CC. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, ISSN 2176-7270, vol. 17, nº1, 2025.
R4EM, v. 8, n. 1, p. 95-105, 2026. DOI: <https://doi.org/10.21708/issn27635325.v8n1.a115467.2026>

- [2] SOMWANSHI, D., et al. Comparison of Fuzzy-PID and PID Controller for Speed Control of DC Motor using LabVIEW. **Procedia Computer Science**, vol. 152, pp.252–260, 2019.
- [3] BANSAL, U. K. & NARVEY, R. Speed Control of DC Motor Using Fuzzy PID Controller. **Advance in Electronic and Electric Engineering**. ISSN 2231-1297, Volume 3, Number 9, pp. 1209-1220, 2013.
- [4] CASTANHO, D. S., et al. Aplicação de um controlador PID Fuzzy adaptativo otimizado via algoritmo genético à um motor de corrente contínua didático. **Anais**, XIII Simpósio de Mecânica Computacional, 2018.
- [5] PARIKH, P., et al. Implementation Fuzzy logic controller and PID controller to a DC encoder motor – A case of on automated guide vehicle. **Procedia Manufacturing**, vol. 20, pp. 219–226, 2018.
- [6] GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022.
- [7] MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia do trabalho científico**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021.
- [8] RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- [9] YIN, R. K. **Pesquisa qualitativa do início ao fim**. Porto Alegre: Penso, 2016.
- [10] CAUCHICK MIGUEL, P. A. **Metodologia de pesquisa para engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- [11] DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Moderno**. 8ª Edição, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001.
- [12] OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5ª Edição, Editora Pearson, 2010.
- [13] GOSWAMI, R. & D. JOSHI, D. Performance review of fuzzy logic-based controllers employed in brushless dc motor. **Procedia computer science**, vol. 132, pp. 623–631, 2018.
- [14] SIMÕES, M. G. & SHAW, I. S. **Controle e modelagem Fuzzy**. 2ª Edição, Editora Blücher – FAPESP, São Paulo, 2007.