

ANÁLISE DO CONTROLE PID APLICADO NO CONTROLE DE VELOCIDADE DE UM MOTOR CC

Felliph do Nascimento Silva (IFPB), E-mail: felliph.nascimento@academico.ifpb.edu.br
Gabriel Schulz Souza (IFPB), E-mail: gabriel.schulz@academico.ifpb.edu.br
Geronimo Barbosa Alexandre (IFPB), E-mail: geronimo.alexandre@ifpb.edu.br

Resumo: O objetivo do trabalho foi a avaliação do controle PID na gestão da velocidade de um motor CC, onde lei de controle foi embarcada no microcontrolador ATMEGA328. O protótipo é composto pela placa Arduino UNO R3, o motor CC, o encoder rotativo e uma ponte H L298n. O controlador PID foi sintonizado pelo método de Cohen-Coon, seguido de ajuste fino para otimizar o desempenho do sistema. A metodologia usada consistiu em (a) modelagem experimental do motor CC, (b) cálculo dos ganhos do controlador e (c) validação experimental do controle em malha fechada com supervisão da velocidade na aplicação SCADA desenvolvida. Os resultados obtidos demonstram a eficácia do controlador em manter a velocidade do motor em diferentes setpoints (200 RPM, 275 RPM e 120 RPM), com erro em regime permanente próximo de zero. O sistema apresentou tempos de subida e acomodação consistentes, com *overshoot* mínimo ou inexistente, indicando uma sintonia adequada dos ganhos do controlador. Além disso, a análise dos parâmetros de desempenho, como ISE, ITAE, IAE e ITSE, confirmou a robustez do sistema frente a variações de velocidade e perturbações.

Palavras-chave: controle, instrumentação, protótipo, supervisão, velocidade.

ANALYSIS OF PID CONTROL APPLIED TO THE SPEED CONTROL OF A DC MOTOR

Abstract: The main objective of the study was to evaluate the effectiveness of PID control in managing the speed of a DC motor, using an embedded system based on the ATMEGA328 microcontroller of the Arduino UNO R3 board. The experimental prototype consisted of a DC motor, a rotary encoder for speed measurement, and an L298n H-bridge for controlling the motor's direction and voltage. The PID controller was tuned using the Cohen-Coon method, followed by fine-tuning to optimize the system's performance. The methodology adopted involved three main steps: (a) experimental modeling of the DC motor, where the system's transfer function was obtained from the step response to voltage; (b) calculation of the PID controller gains using the Cohen-Coon method, with fine adjustments to improve the system's response; and (c) experimental validation of the closed-loop control, with speed supervision through a developed SCADA application for monitoring and data acquisition. The results demonstrated that the PID controller was effective in maintaining the motor speed at different setpoints (200 RPM, 275 RPM, and 120 RPM), with a steady-state error close to zero. The system showed consistent rise and settling times, with minimal or no overshoot, indicating proper tuning of the controller gains. Additionally, the analysis of performance parameters such as ISE, ITAE, IAE, and ITSE confirmed the system's robustness against speed variations and disturbances.

Keywords: control, instrumentation, prototype, supervision, speed.

1. Introdução

O controle de velocidade de um motor CC (Corrente Contínua) é um aspecto fundamental em diversas aplicações, desde pequenos dispositivos eletrônicos até grandes máquinas industriais. A capacidade de ajustar a velocidade de um motor CC permite otimizar o desempenho, a eficiência e a precisão em diferentes cenários.

Existem diversos métodos para controlar a velocidade de um motor CC, cada um com suas vantagens e desvantagens. Os métodos mais comuns são: (a) variação da tensão de armadura; (b) variação da corrente de armadura e (c) o controle PWM (modulação por largura de pulsos).

Em Santos (2017) foi construído um protótipo experimental para o ajuste de velocidade do motor CC, usando a placa Arduino UNO R3 e uma ponte H. Foram levantados os parâmetros do motor, experimentalmente e mensurados no osciloscópio. Com os dados experimentais foi construído o modelo em função de transferência, em ambiente de simulação no Simulink / MATLAB foi validado o controle por realimentação de estados para o modelo do motor.

No trabalho de Oliveira, *et al* (2024), o modelo do motor CC foi levantado experimentalmente, onde foi aplicado um degrau de tensão de 6V e mensurados a tensão e a velocidade do motor, do instante inicial até atingir o regime permanente. A partir dos dados medidos, usou-se o *toolbox System Identification* do MATLAB para levantar o modelo de primeira ordem com atraso para a dinâmica do motor CC. Na sequência foi usando o Método de Cohen-Coon para obter os ganhos proporcional, integral e derivativo do controlador. Após a sintonia, o controle foi validado experimentalmente, com os dados do setpoint e da velocidade do motor CC, sendo plotados em interface gráfica do MATLAB.

Em Sayyad & Gavhane (2023) a malha fechada para o controle PI e o modelo do motor CC foram implementados no Simulink/MATLAB, onde foi explorado dois cenários de velocidade do motor. Vale salientar que o modelo em função de transferência foi obtido a partir dos dados de placa (fabricante) e das equações integro-diferenciais para o campo e a armadura do motor de corrente contínua.

No Trabalho de Khan & Kadri (2013) é usado a técnica Hardware-in-loop (HIL), onde o controlador PI é implementado no microcontrolador ATMEL 8051 da Intel e o modelo da planta (motor CC) é implantado em simulação usando o Simulink / MATLAB. Em Gavran, Frunk e Vujisic (2017) é usada a técnica HIL, onde há a integração do Arduino com o Simulink, sendo a planta física real (motor CC) e o controle PI é implementado em simulação, o controle é validado em dois cenários com e sem perturbações ao processo (travamento do eixo do motor).

Neste cenário, o objetivo desta pesquisa é a avaliação experimental do controle PID aplicado no controle de velocidade de um motor CC, a planta física é composta do motor CC, do encoder rotativo e da ponte H dupla L298n. Já o controle PID foi embarcado no microcontrolador ATMEL ATMEGA328 da placa Arduino UNO R3. Os ganhos do controlador foram obtidos pelo método de Cohen-Coon, seguido por um ajuste fino e os parâmetros de desempenho em malha fechada são debatidos na ótica do tempo e na ótica da integral do erro.

2. Materiais e Métodos

Os passos metodológicos implementados para consecução dos objetivos da pesquisa estão dispostos no fluxograma da Figura 1. Inicialmente foi feita a revisão bibliográfica nas seguintes plataformas acadêmicas: IEEE Explorer Digital Library, ScienceDirect, ResearchGate, Periódico Capes e Google Acadêmico. Desta forma o trabalho trata-se de uma pesquisa quali-quantitativa com apresentação de um produto.

Após a revisão do estado da arte, foi elaborado os desenhos 2D e 3D do protótipo, bem como a lista de material com o respectivo orçamento. Na sequência foi confeccionada a bancada de controle de velocidade, instalação da instrumentação e desenvolvimento do sistema supervisor. Com o produto confeccionado foram feitos os testes de avaliação do controle PID experimental. Os materiais utilizados para confecção do protótipo experimental estão dispostos na Tabela 1. O protótipo experimental apresentou um custo de R\$ 153,00.

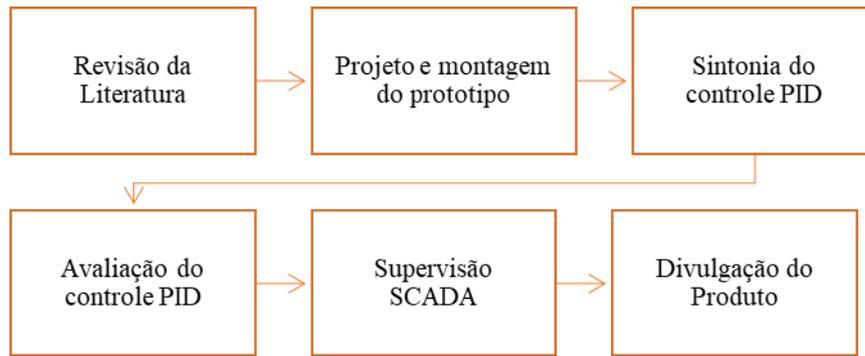


Figura 1 – Processo metodológico da pesquisa. (Autoria própria, 2025).

Tabela 1 – Materiais utilizados no protótipo e orçamento.

Material	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)
Arduino Uno R3	1	38,00	38,00
Fios e cabos	-	10,00	10,00
Motor CC com encoder	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	-	-	153,00

Fonte: dados da pesquisa (2025).

Na Figura 2 é ilustrado o diagrama de ligação elétrica dos componentes usados na montagem. Os pinos 2 e 3 são os pinos externos usados na função de interrupção, que são disparadas pelos pulsos do encoder rotativo. O pino 4 é o pino PWM para controlar a tensão fornecida ao *driver* do motor (ponte H).

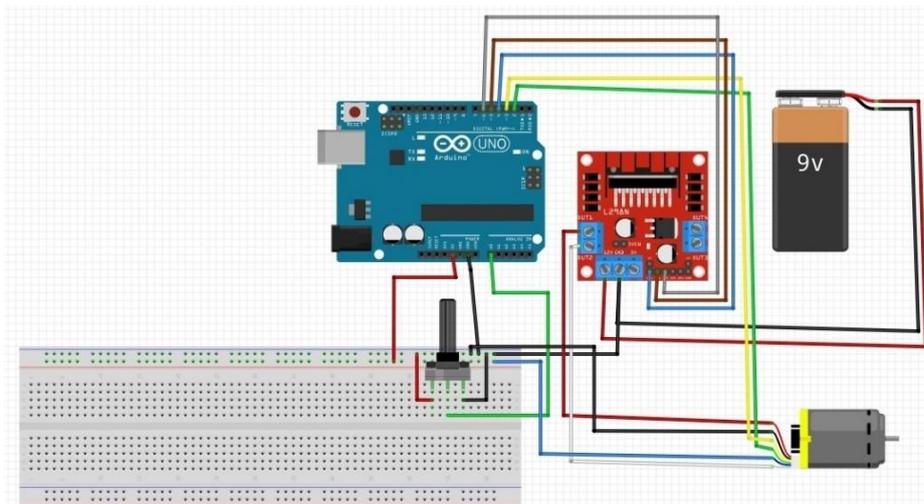


Figura 2 – Diagrama elétrico para o sistema de controle PID de velocidade.

Tabela 2 – Diagrama de pinagem da placa Arduino UNO R3 usada na montagem experimental.

Descrição	Pino	Funcionalidade
Encoder A	3	Medição de velocidade e posição
Encoder B	2	Medição de velocidade e posição
Sinal PWM	4	Sinal PWM que será enviado à ponte H
Entrada de interrupção 1	5	Sinal usado para controle de direção
Entrada de interrupção 2	6	Sinal usado para controle de direção
Potenciômetro	A0	Leitura analógica usado como velocidade de referência

Fonte: dados da pesquisa (2025).

Os pinos 5 e 6 são usados para alterar a direção do motor, alterando a polaridade da tensão de alimentação para o motor. O pino A0 é feita a leitura analógica do potenciômetro que define a velocidade de referência. A Tabela 2 ilustra o diagrama de pinagem do Arduino UNO usado na prática experimental.

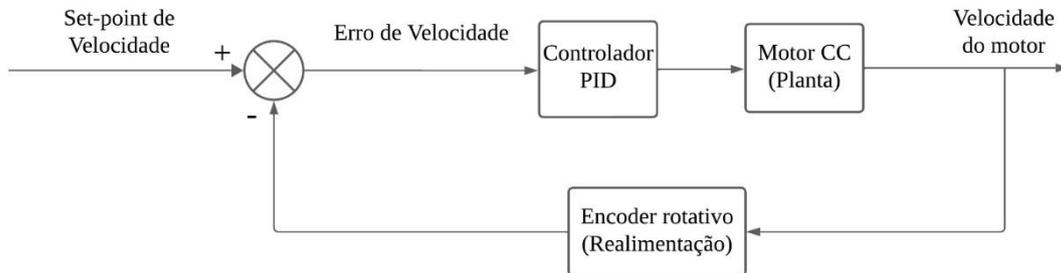


Figura 3 – Diagrama de controle de velocidade do motor CC em malha fechada.

O diagrama em malha fechada com controle PID é ilustrado na Figura 3. 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 ATMEGA 328.

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 simplesmente controla a quantidade de 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 (L298M), 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.

2. 1. Experimento de Modelagem do Sistema

Com o intuito de obter o modelo em função da transferência do motor CC, foi realizado um experimento em malha aberta para registrar a curva da velocidade frente a um degrau de 6V de tensão. A fonte CC foi ligada e o motor começou a girar livremente até atingir a estabilização em 290,25 RPM.

Os dados para plotar a curva de velocidade em função do tempo foram obtidos por meio da integração da IDE Arduino e o ScadaBR (sistema SCADA *Open Source*). A tela da aplicação SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) desenvolvida é ilustrada na Figura 4, a tela foi ajustada para mostrar o gráfico e o valor instantâneo da velocidade, também foi configurado um botão para ligar e desligar o motor CC.

Da inspeção da Figura 4, podemos ver que a resposta tem a aparência da resposta de uma planta de primeira ordem com atraso ao degrau unitário. Portanto, ajustamos o modelo de primeira ordem aos dados medidos, dado como, (DORF & BISHOP, 2001) e (OGATA, 2010),

$$P(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} [RPM] \quad (1)$$

Após a inspeção da Figura 4, a velocidade de estado estacionário alcançada pelo motor

é de aproximadamente 290,25 RPM. Como se trata de uma entrada degrau de 6 volts, podemos considerar a entrada como um ciclo de trabalho igual a 1 (100%), logo o ganho CC para o modelo de primeira ordem é simplesmente $K=290,25$ RPM.

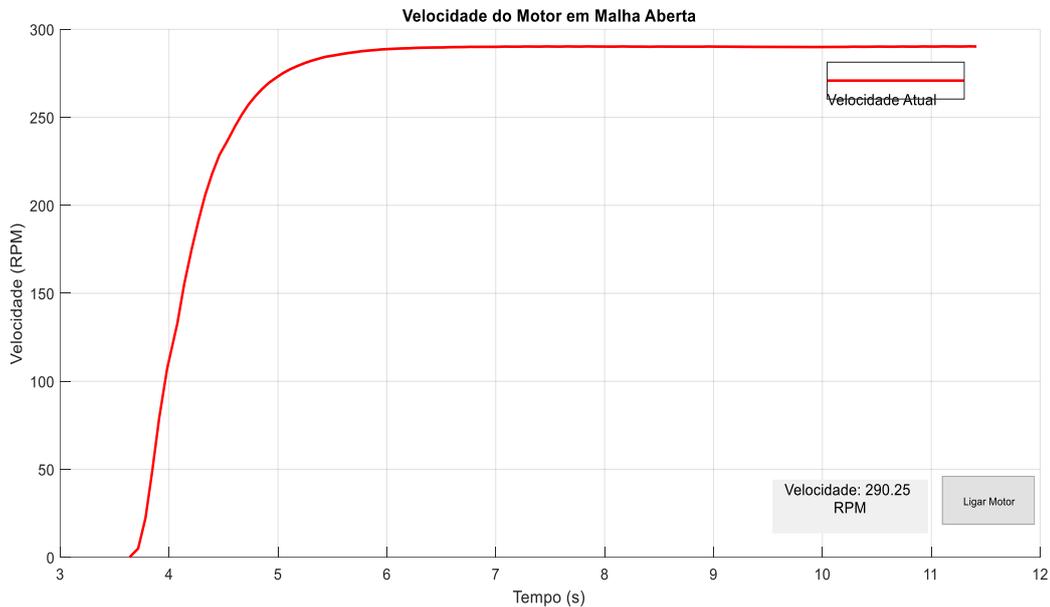


Figura 4 – Resposta da velocidade ao degrau de tensão de 6V.

A constante de tempo (τ), é definido como o tempo que o processo leva para atingir 63,2% de seu carregamento total. Portanto, podemos estimar a constante de tempo com base no tempo que a velocidade do motor leva para atingir 63.2% da velocidade em regime permanente, $0.632 \times 290,25 \approx 183$ RPM. Este valor de velocidade ocorre em 4,2385 segundos, mas a entrada de tensão só foi acionada após 3,6377 segundos (tempo morto), podemos estimar a constante de tempo do motor em aproximadamente 0,6 segundos. Portanto, o modelo do tipo caixa preta para o motor é o seguinte,

$$P(s) = \frac{290,25}{0.6s + 1} e^{-3.64s} \text{ [RPM]} \quad (2)$$

Da equação (2), percebe-se que o modelo da planta apresenta um polo em $s=-1.67$ e ganho direto de 290,25 RPM.

2. 2. Sintonia do Controlador PID

O método de Cohen e Coon (Cohen e Coon, 1953) foi proposto para sintonia de plantas com tempo morto, pressupõe que o processo possa ser descrito por um modelo de primeira ordem com ganho K , constante de tempo τ e tempo morto θ . Tomando como referência o modelo descrito na equação (2), temos: $K=290,25$, $\tau=0,6$ e $\theta=3,64$.

Tabela 3. Ganhos adquiridos pelo método de Cohen-Coon.

Ganho	Fórmula	Valor
Proporcional	K_p	0,016
Integral	$K_i=K_p/T_i$	$4 \cdot 10^{-3}$
Derivativo	$K_d=K_p \cdot T_d$	0,001

Fonte: dados da pesquisa (2025).

Tomando os dados do modelo e as equações do método obtivemos os seguintes valores para o ganho proporcional, tempo de integração e tempo de derivação respectivamente:

$K_p=0,016$, $T_i=4,1s$ e $T_d=0,63$. Os ganhos do controlador determinados pelo método de Cohen-Coon, estão descritos na Tabela 3. Adiante, os resultados foram inseridos no código do Arduino para realizar a implementação prática do sistema. Desta maneira, é possível verificar se a velocidade do motor é controlada e mantém-se no valor do *setpoint* desejado.

3. Resultados e Discussões

Na Figura 5 é ilustrado a bancada didática usada para o controle da velocidade do motor CC referente ao diagrama elétrico da Figura 2. O protótipo experimental foi montado no Laboratório de Eletrônica do IFPB Campus Cajazeiras.

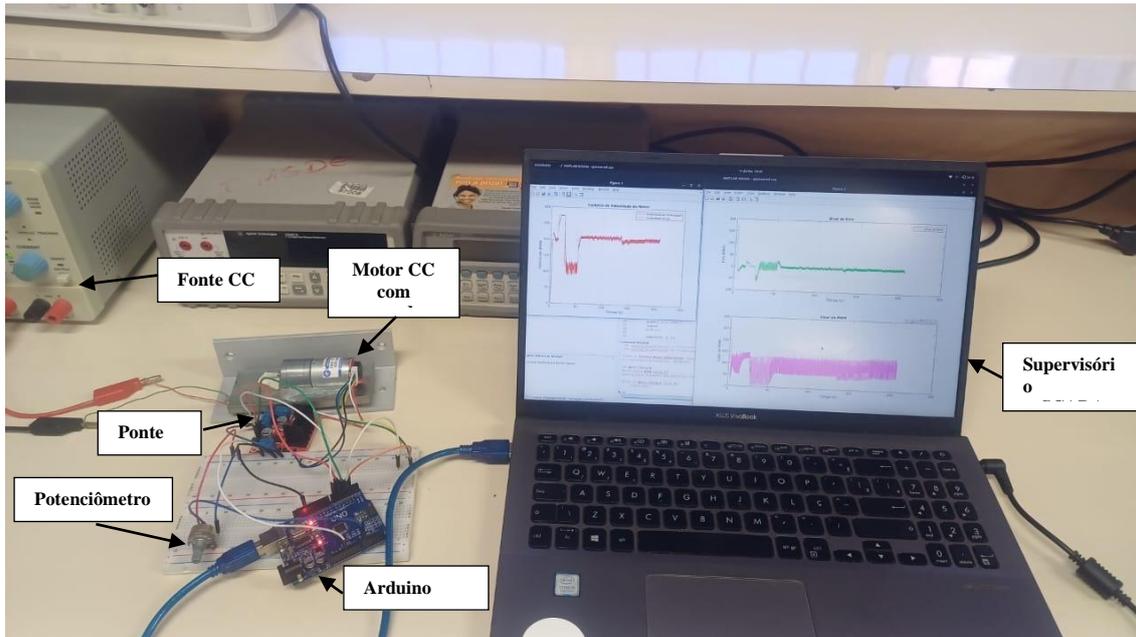


Figura 5 – Detalhes da bancada de controle de velocidade.

A fonte CC fornece 12V a ponte H, esta fornece de 0-6V (via PWM) ao motor CC conforme o setpoint fornecido (vindo do divisor de tensão do potenciômetro) na entrada analógica A0. A taxa de transmissão de dados usada na comunicação serial (*Baud Rate*) foi de 9.600, sem bit de paridade, com velocidade de *clock* de 10MHz.

O experimento de validação do controle PID na gestão da velocidade ocorreu no dia 11/02/2205, os dados mensurados foram exportados e plotados na *interface* de monitoramento SCADA desenvolvida. Vale salientar que as mudanças na referência de controle são obtidas girando o potenciômetro.

Na Figura 6 é possível ver o comportamento da ação de controle, com a saída seguindo a referência de controle num cenário de vários degraus de velocidade.

Percebe-se que o sistema é estável e bem comportado em malha fechada, mostrando que a lei de controle consegue levar a saída controlada a seguir as referências de controle, com erro em regime permanente nulo.

A Tabela 4 foi organizada para apresentar os valores dos parâmetros de desempenho do controle PID frente aos três degraus de velocidade (200 RPM, 275 RPM e 120 RPM), vide Figura 6.

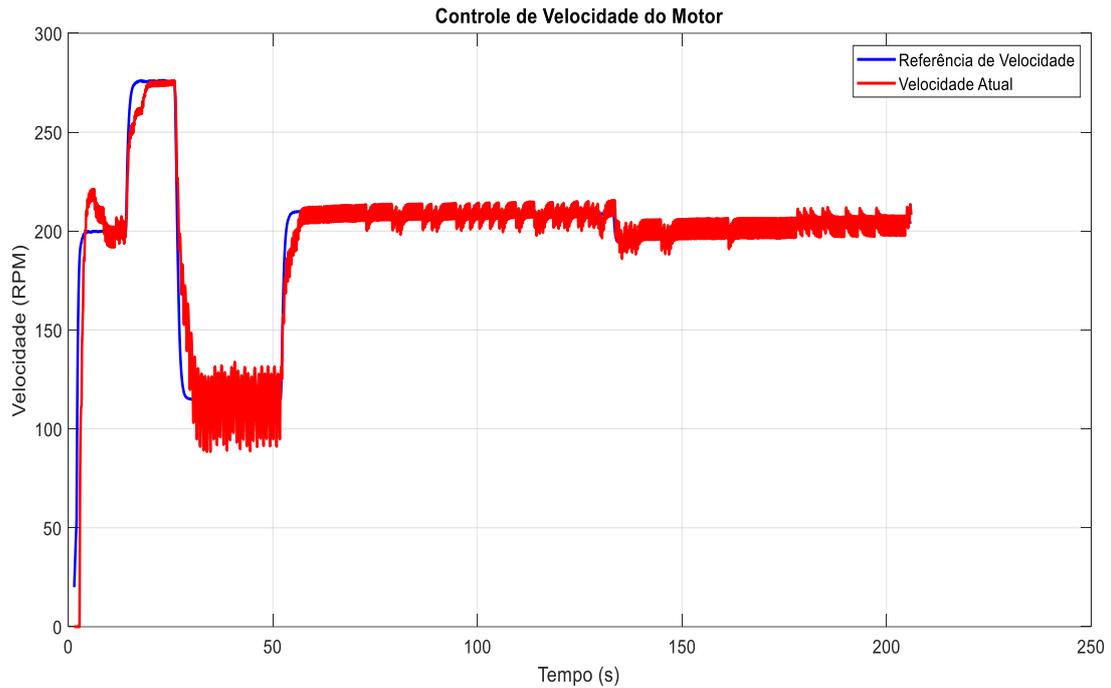


Figura 6 – Resposta em malha fechada do controle PID.

Tabela 4. Dados de desempenho e robustez do controle PID experimental.

Parâmetro	Set-point de 200	Set-point de 275	Set-point de 120
	RPM	RPM	RPM
Tempo de subida	3,69s	4,2s	4,0s
Tempo de acomodação	9,3s	10s	10s
Overshoot	10,0%	0,0%	0,0%
Valor do pico	220	275	120

Fonte: dados da pesquisa (2025).

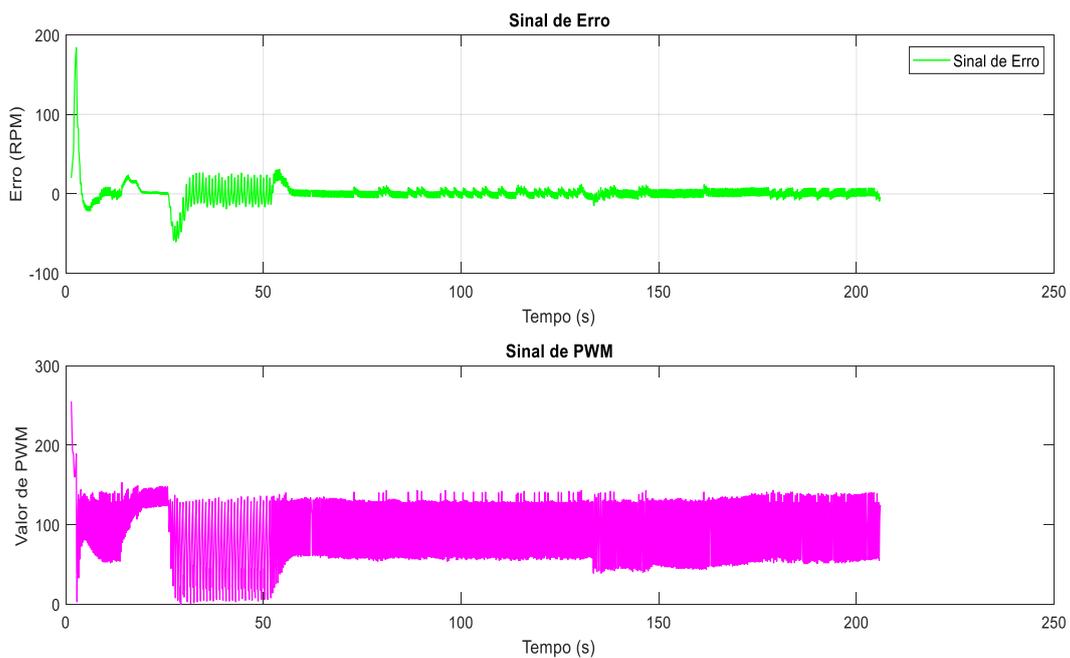


Figura 7 – Gráficos do sinal de erro e do sinal PWM frente aos degraus de velocidade.

A Figura 7 ilustra o sinal do erro e o sinal do PWM para o cenário de degraus de velocidade descritos na Figura 6. O erro é definido como a diferença entre o *setpoint* (referência) e o valor da velocidade medido pelo encoder rotativo.

Do gráfico da Figura 7 percebe-se que o sinal PWM oscilou em torno de 100 unidades, fazendo a conversão para tensão, $(100 \cdot 5V) / 255 = 1,96V$, o seja o sinal PWM de tensão entregue a ponte H foi de 1,96V com uma frequência de 490Hz.

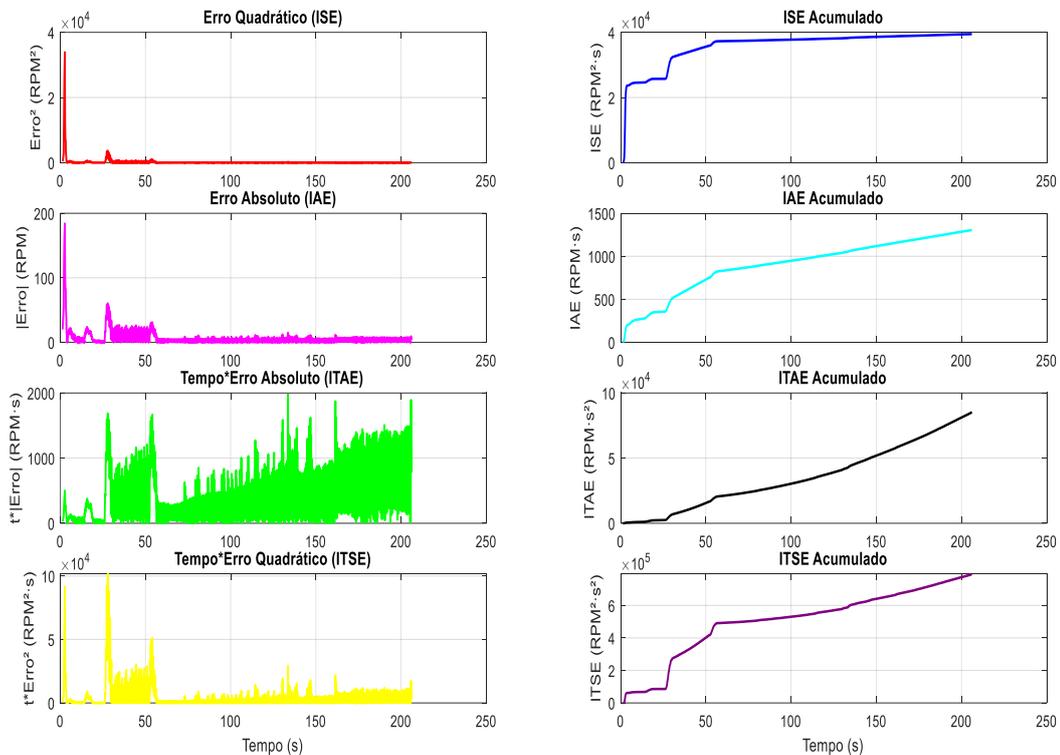


Figura 8 – Parâmetros de desempenho na ótica da integral do erro.

Na Figura 8 é ilustrado os parâmetros de desempenho do controlador na ótica da integral do erro (ISE - Integral of Squared Error, ITAE - Integral of Time-weighted Absolute Error, IAE - Integral of Absolute Error e ITSE - Integral of Time-weighted Squared Error) para o cenário de degraus de velocidade. Percebe-se que o erro converge para zero em regime permanente em todos os cenários, mostrando a eficácia da ação integral. Nas mudanças operacionais o erro é diferente de zero, contudo quando a saída mensurada acompanha a referência, o erro converge para zero, demonstrando a eficácia da estratégia de controle PID aplicada.

Conforme Li, *et al* (2005), os critérios de desempenho ISE, ITAE, IAE e ITSE são métricas que avaliam a resposta do sistema em termos do erro entre o valor desejado (*setpoint*) e o valor atual da variável controlada. Eles são calculados como integrais ao longo do tempo, ponderando o erro de diferentes maneiras para enfatizar aspectos específicos do desempenho, como a magnitude do erro, a duração do erro ou a influência do tempo.

Os gráficos experimentais confirmam que o controle PID implementado é capaz de gerenciar a velocidade do motor CC com alta precisão e estabilidade, atendendo aos requisitos de desempenho desejados. Este estudo valida a aplicação prática do controle PID em sistemas de controle de velocidade, destacando a importância de uma sintonia

adequada e da validação experimental para garantir um desempenho ótimo.

4. Conclusões

O trabalho apresentado demonstrou a eficácia do controle PID na gestão da velocidade de um motor CC, utilizando um sistema embarcado baseado no microcontrolador ATMEGA328. A metodologia adotada incluiu a identificação do sistema, a sintonia dos ganhos do controlador pelo método de Cohen-Coon e a validação experimental do controle em malha fechada. Os resultados mostraram que o sistema é estável e capaz de seguir diferentes *setpoints* de velocidade com erro em regime permanente nulo, comprovando a eficiência da estratégia de controle PID implementada.

A análise dos gráficos da resposta experimental do controle revela que o sistema apresenta um tempo de subida e acomodação consistentes, com *overshoot* mínimo ou inexistente em alguns cenários, o que indica uma sintonia adequada dos ganhos proporcional, integral e derivativo. A ação integral do controlador foi particularmente eficaz em eliminar o erro residual, enquanto a ação derivativa contribuiu para reduzir oscilações e melhorar a estabilidade do sistema.

O uso da aplicação SCADA permitiu o monitoramento eficiente do sistema, facilitando a análise e ajuste dos parâmetros de controle. Os parâmetros de desempenho atenderam aos requisitos de projeto (Overshoot menor que 13%, tempo de acomodação menor que 12s e tempo de pico menor que 5s).

O modelo de primeira ordem com atraso para a dinâmica do motor foi uma aproximação simplificada que não leva em consideração as não linearidades do motor, como por exemplo: a corrente de saturação de campo, o atrito estático e as variações de carga.

Como trabalhos futuros sugere-se: (a) Sintonia e validação de outras estratégias de controle, a exemplo de *PI Fuzzy*, *Model-Free Control* ou PID inteligente (controle adaptativo); (b) implementar na aplicação SCADA, sistema de alarmes caso haja um mal funcionamento operacional.

Agradecimentos

Ao IFPB Campus Cajazeiras pela disponibilização da estrutura laboratorial durante a condução dos experimentos.

Referências

CHONG, G.C.Y.; ANG, K. H.; LI, Y. *PID control system analysis and design*. IEEE Control Systems Magazine. Vol. 26, Issue 1, page 32-41, 2006. DOI: 10.1109/MCS.2006.1580152

COHEN, G. H., & COON, G. *Theoretical consideration of retarded control*, Trans. ASME, 827-834, 1953.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Sistemas de Controle Moderno*. 8ª Edição, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001.

Download. *IDE Arduino*, 2025. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/software>. Acesso em: 05 fevereiro de 2025.

GAVRAN, M.; FRUK M.; VUJISIC, G. *PI controller for DC motor speed realized with Arduino and Simulink*. 2017, 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). DOI: 10.23919/MIPRO.2017.7973669.

KHAN, H. S. & KADRI, M. B. *DC motor control by embedded PI controller with hardware-in-the-loop*

Simulation. 2013, 3rd IEEE International Conference on Computer, Control and Communication (IC4). DOI: 10.1109/IC4.2013.6653742

LI, Y.; ANG, K. H.; CHONG, G.C.Y. *PID control system analysis, design, and technology*. IEEE Transactions on Control Systems Technology. Vol. 13, Issue 4, page 559-576, 2005. DOI: 10.1109/TCST.2005.847331

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 5ª Edição, Editora Pearson, 2010.

OLIVEIRA, et al. *Modelagem experimental da resposta dinâmica e do controle de velocidade de um motor DC utilizando uma placa de prototipagem eletrônica*. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.10, n.2, p.01-18, 2024.

SANTOS, T. M. *Controle de velocidade de um motor de corrente contínua por realimentação de estados observados*. 57fls. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, 2017.

SAYYAD, S. N. & GAVHANE, W. A. *DC Motor Speed Control Using PI Controller*. Journal of Engineering Sciences. Vol. 14, Issue 06, 2023.