

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE PID PARA FINS EDUCACIONAIS

André Rodrigues Sanches (FHO) andresanches@alunos.fho.edu.br

Daniel Augusto Pagi Ferreira (FHO) danielferreira@alunos.fho.edu.br

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e implementação de um sistema de controle de posição para motor de corrente contínua (DC) utilizando um controlador Proporcional–Integral–Derivativo (PID) na plataforma Arduino e aplicá-lo como ferramenta didática, permitindo aos alunos observar de forma prática a influência dos parâmetros do controlador e consolidar o aprendizado teórico sobre automação. O estudo fundamenta-se nos conceitos teóricos de controle automático, amplamente aplicados na automação industrial, com o intuito de compreender o comportamento dinâmico do sistema diante das variações dos parâmetros de controle. A metodologia adotada envolveu quatro etapas principais: levantamento teórico, levantamento prático, programação e análise dos resultados. Foram testados os controladores P, PD, PI e PID, comparando o desempenho de cada um quanto à estabilidade, erro estacionário e tempo de resposta. Os resultados experimentais demonstraram que o controlador PD apresentou melhor desempenho, proporcionando rápida resposta e erro estacionário nulo ao sintonizar corretamente. Dessa forma, o estudo contribui para o aprimoramento do ensino de engenharia, ao integrar teoria e prática por meio de uma aplicação acessível, eficiente e educativa, reforçando a importância do uso de sistemas embarcados e do controle PID em processos industriais e acadêmicos.

Palavras-chave: controle pid, arduino, motor de corrente contínua.

1. Introdução

O avanço tecnológico tem promovido transformações profundas em todos os setores da sociedade, e na indústria, essa evolução tem se consolidado por meio do conceito da automação industrial. “Automação é o uso de comandos lógicos programáveis e de equipamentos mecanizados para substituir as atividades manuais que envolvem tomadas de decisão e comandos-resposta de seres humanos” (LAMB, 2015, p. 02). Sendo assim, a utilização da automação aumenta a eficiência, tornando as empresas competitivas no mercado.

O controle automático é essencial em qualquer campo da engenharia e da ciência. O controlador tipo Proporcional–Integral–Derivativo (PID) é ainda hoje predominante no meio industrial. Mais de 90% de todas as malhas existentes são do tipo PI / PID atingindo uma larga faixa de aplicações: controle de processos, drivers para motores, indústria automobilística,

controladores de voo, pilotos automáticos, instrumentação industrial, entre outros (ÅSTRÖM e HÄGGLUND, 2001). Para realizar a sintonia do controlador múltiplas técnicas foram propostas, a pioneira são as regras de Ziegler-Nichols. Essas regras foram um marco nesse campo pela sua simplicidade de aplicação e com o passar dos anos outras regras de sintonia foram propostas como as de Cohen-coon, método de CHR entre outros.

Com o avanço tecnológico, o mercado de trabalho tem sofrido com escassez de mão de obra. De acordo com Yamakami (2025) as companhias brasileiras reclamam de dificuldades para encontrar profissionais com as competências necessárias. A educação proporciona esta qualificação, porém, há uma necessidade de que haja uma conciliação de ensino prático e teórico, pois “permite que os alunos coloquem em prática os conceitos teóricos aprendidos em sala de aula, o que ajuda a consolidar conhecimentos e desenvolver habilidades essenciais para o mercado de trabalho.” (FERNANDES, LOPES e DALTON, 2023, p. 03).

Considerando os conceitos apresentados anteriormente, o objetivo deste trabalho é desenvolver um projeto que visa compreender o desempenho do motor após sofrer alteração das variáveis do controlador PID de maneira clara podendo assim ser utilizado como exemplificação em aulas práticas. Os objetivos específicos são: (i) realizar o levantamento teórico; (ii) identificar os materiais necessários para a aplicação e projetar o circuito protótipo; (iii) criar um programa capaz de utilizar os parâmetros do controlador que influenciem no posicionamento do motor, com um display para visualizar e transferir os dados gerados durante a operação para criação de gráficos; e (iv) avaliar a performance do sistema em relação ao material teórico e se atende aos requisitos necessários para ser utilizado educacionalmente.

2. Referencial teórico

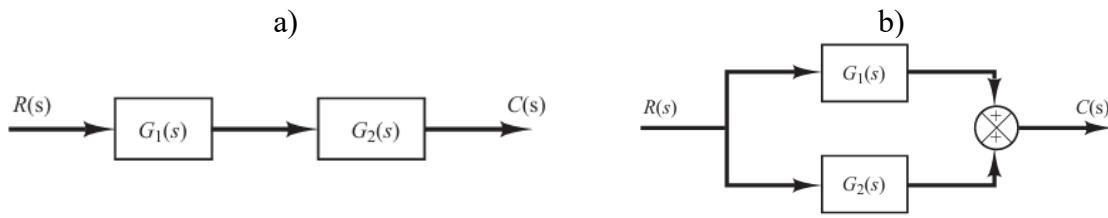
O processo industrial é o conjunto de operações planejadas criadas para acelerar as entregas e reduzir custos, de forma organizada, eficiente e diminuindo possibilidades de erros. Com a crescente complexidade das linhas de produção, a produção em alta escala e a necessidade de atender padrões internacionais, torna-se essencial controlar de maneira rigorosa variáveis como temperatura, pressão, velocidade, nível e fluxo.

“O controle automático é essencial em qualquer campo da engenharia e da ciência. O controle automático é um componente importante e intrínseco em sistemas de veículos espaciais, sistemas robóticos, modernos sistemas de manufatura e quaisquer operações industriais que envolvam o controle de temperatura, pressão, umidade, viscosidade, vazão etc.” (OGATA, 2010, p. 12).

O sistema de controle utiliza estas variáveis para realizar o controle e manter no valor desejado (set point), e compara com o valor medido para realizar as correções automáticas sem a necessidade de intervenção humana.

Os sistemas de controle são classificados em dois tipos: sistemas de controle em malha aberta e sistemas de controle em malha fechada. Os sistemas de controle de malha aberta são aqueles em que o sinal de saída não é comparado com o valor desejado para um determinado processo (*Setpoint*). Como pode se observar na Figura 1, estes são exemplos de diagramas usados para exemplificar sistemas de malha aberta, onde (a) consiste em um sistema de cascata e (b) um sistema em paralelo. As principais vantagens deste método é que são simples e não apresentam problemas de estabilidade, porém é preciso haver uma regulagem periódica para manter a qualidade do sistema, pois quaisquer distúrbios podem acarretar erros que afetam o sinal de saída.

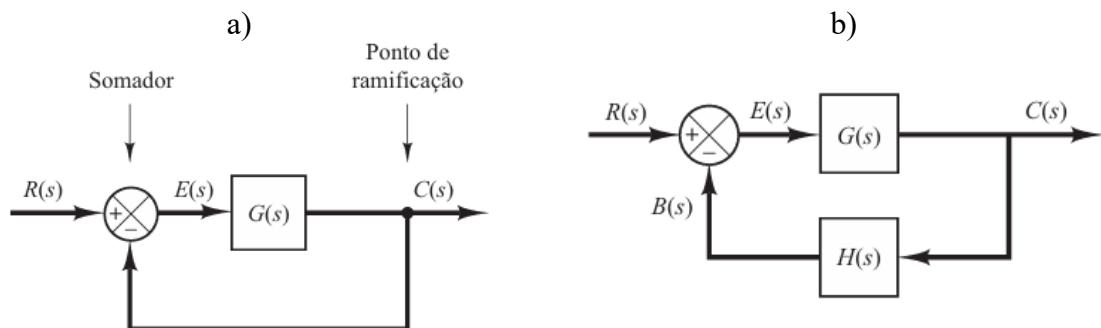
Figura 1 - Diagramas de blocos de sistemas de malha aberta e associados em a) Série (cascata) e b) Paralelo



Fonte: OGATA (2010)

Em contrapartida, os sistemas de controle de malha fechada possuem realimentação, isto é, possuem um sinal de erro que consiste na diferença entre o sinal de entrada e o sinal de saída que realimenta o controlador de forma a corrigir a saída buscando chegar no valor desejado (*setpoint*).

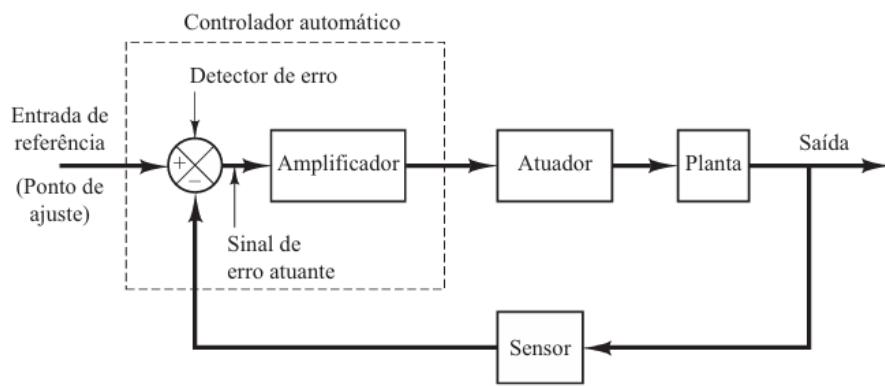
Figura 2 – Diagrama de bloco de um sistema de malha fechada com realimentação a) Unitária e b) Bloco $H(s)$ genérico.



Fonte: OGATA (2010)

Como pode se observar na Figura 2, um sistema de malha fechada pode possuir realimentação unitária ou através de uma função de transferência que neste caso é $H(s)$. Este método possui uma alta precisão e responde melhor a distúrbios por possuir uma realimentação que compensa qualquer mudança externa ou interna. Um diferencial é seu controle automático que após projetado não há necessidade de intervenção humana no processo. Porém, por ser um sistema de maior complexidade impõe um tempo de resposta maior e um cuidado maior na calibragem pois pode acarretar um sistema instável. Na Figura 3 mostra uma exemplificação de um sistema de controle industrial automático.

Figura 3 - Diagrama de bloco de um sistema de controle industrial automático



Fonte: OGATA (2010)

Atualmente, possuem diversos controladores de processos, porém, o enfoque será no controlador PID. Segundo Cravo (2025), o controle PID é uma técnica para ajustar automaticamente as variáveis de um sistema, garantindo a saída desejada mesmo com distúrbios. Este controlador possui três variáveis: proporcional (P), integral (I), derivativo (D).

2.1. Ação Proporcional (P)

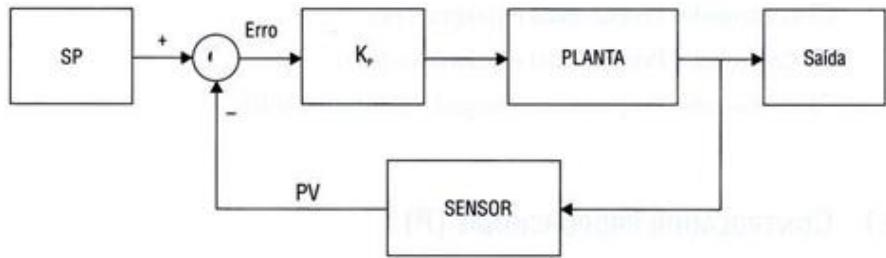
“O controlador proporcional (P) gera a sua saída proporcionalmente ao erro $e(t)$. O fator multiplicativo (K_p) é conhecido como o ganho do controlador” (CAMPOS e TEIXEIRA, 2006, p. 23). A seguir, está a equação do algoritmo de posição do controlador, onde $u(t)$ é a saída do controlador, K_p é o ganho proporcional e $e(t)$ é o erro da variável.

$$u(t) = K_p \times e(t) + u_0$$

Na Figura 4 mostra a estrutura de um controlador do tipo P. Uma característica importante desse tipo de controle é que, se o sistema não tiver um integrador, sempre haverá um pequeno erro constante no valor de saída. Esse erro, chamado de erro estacionário, depende do ganho proporcional (K_p) e das características da planta. É possível reduzir esse erro aumentando o

valor de K_p . Porém, quanto maior o ganho proporcional, maior também será a tendência de o sistema oscilar e levar mais tempo para estabilizar a variável controlada.

Figura 4 - Diagrama de bloco de controlador P



Fonte: CAMPOS e TEIXEIRA (2006)

O controle proporcional puro é normalmente aplicado em processos contendo constantes de tempo simples e responde rapidamente tanto aos distúrbios como às alterações do ponto de ajuste. A sintonia é simples por conter apenas um único parâmetro.

2.2. Ação Proporcional-Integral (PI)

Este controlador possui uma ação integral, tende a ter uma taxa de variação do sinal de saída com relação a entrada. Esta ação busca eliminar o erro de estado estacionário. Este tipo de controlador é utilizado em sistemas que não requerem resposta muito rápida e para processos de primeira ordem, por exemplo, controle de nível.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

2.3. Ação Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Este controlador é a combinação dos três tipos Proporcional (P), Integral (I), Derivativo (D). O termo derivativo (D) antecipa a tendência futura do erro, melhorando a resposta dinâmica e reduzindo o tempo de subida (*overshoot*) e tempo de acomodação. A função de transferência desse controlador é dada por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de}{dt}(t) + u_0$$

Nesse tipo de controlador, a ação integral é utilizada para eliminar o erro permanente que pode surgir quando há grandes variações de carga. Já a ação derivativa, por ter um efeito estabilizador, permite utilizar um ganho maior e diminui a tendência de o sistema oscilar. Como resultado, a resposta do sistema se torna mais rápida em comparação aos controladores P e PI.

2.4. Aplicações típicas dos controladores P, PI e PID

Após a definição conceitual e funcional de cada tipo de controlador, o quadro 2 contém suas principais aplicações, evidenciando os contextos em que cada controlador se mostra mais adequado e eficiente no âmbito dos sistemas de controle.

Quadro 1 - Características principais e aplicações típicas dos tipos de controladores

Controlador	Características	Aplicação Típica
P	Tem desvio do “setpoint” em regime permanente.	Controle de nível
PI	Não tem desvio do “setpoint” em regime permanente. Sistema mais “nervoso”	Controle de vazão, nível e pressão
PID	A resposta é mais estável em malhas lentas e sem ruídos, e com tempos mortos razoáveis, mas não muito elevados.	Controles de composição e temperatura

Fonte: CAMPOS e TEIXEIRA (2006)

2.5. Sintonia de controladores

A sintonia de controlador consiste no processo de ajuste dos parâmetros que determinam o comportamento dinâmico de um sistema de controle, com o objetivo de alcançar uma resposta estável, precisa e rápida diante de perturbações ou variações na referência. Com isso, os valores ideais para o ganho proporcional, integral e derivativo são obtidos. Uma sintonia adequada é fundamental para garantir que o sistema opere com eficiência, minimizando o erro estacionário, o tempo de acomodação e a ocorrência de oscilações indesejadas.

3. Metodologia

O desenvolvimento deste projeto foi baseado em pesquisas bibliográficas e artigos científicos, além de execução em softwares para integração dos dados. Em linhas gerais, o desenvolvimento deste trabalho pode ser dividido em quatro fases:

- Levantamento teórico: compreender através de pesquisas e datasheets os componentes que compõem o projeto.
- Levantamento prático: averiguação dos materiais necessários para a aplicação. O circuito protótipo foi projetado no Circit Designer, e a base estrutural do projeto foi modelada no Prusa Slicer para posterior impressão 3D.

- Programação: aplicar o conhecimento teórico para a criação do programa no Arduino capaz de realizar a função do controlador PID, após implementado, transferência de dados para o Serial plotter para plotagem de gráficos em tempo real.
- Resultados: verificar o desempenho do controlador projetado de acordo com o referencial teórico.

3.1. Levantamento teórico

Para o desenvolvimento do projeto, é fundamental compreender detalhadamente os componentes que o compõem, uma vez que o conhecimento de suas características e funcionalidades é essencial para garantir um desempenho eficiente e resultados satisfatórios do sistema.

3.1.1. Motor de corrente contínua (DC)

O motor de corrente contínua (DC) funciona através da conversão de energia elétrica em energia mecânica, por meio da interação entre o campo magnético e a corrente aplicada à armadura, resultando em torque sobre o eixo. Em um sistema de controle, o motor DC atua como elemento atuador, recebendo o sinal de controle gerado por um controlador, neste caso o PID, que compara a variável de saída (posição) com o valor de referência desejado.

O motor escolhido foi o CHR-GM 25-370, possui um redutor de relação 1:34 e com 6V (tensão máxima) atinge 210 rpm.

Segundo Nise (2013), o comportamento dinâmico do motor de corrente contínua pode ser representado por uma função de transferência que relaciona a tensão de armadura $V_a(s)$ com a velocidade angular $\omega(s)$:

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(L_a s + R_a)(Js + B) + K_m K_b}$$

Em aplicações de controle de posição, a variável de interesse é o deslocamento angular $\theta(s)$, que é a integral da velocidade. Assim, a função de transferência completa do motor é:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{s[(L_a s + R_a)(Js + B) + K_m K_b]}$$

Observa-se a presença de um integrador no denominador ($1/s$), o que caracteriza o sistema como do tipo 1, conforme a teoria clássica de controle de Ogata (2010). Isso implica que, para

uma entrada do tipo degrau (posição fixa), o erro em regime permanente tende a zero, mesmo sob controle proporcional puro, desde que o sistema permaneça estável.

Consequentemente, o uso de controladores PI ou PID não é essencial para eliminar o erro estacionário neste tipo de planta, mas sim para melhorar a resposta transitória, reduzindo o tempo de acomodação, o *overshoot* e as oscilações do sistema.

A dinâmica de um motor DC pode ser aproximada, para fins de análise de controle de posição, pela seguinte função de transferência entre a tensão de armadura $V_a(s)$ e a posição angular $\theta(s)$:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{s(T_m s + 1)}$$

em que K representa o ganho estático do motor, isto é, a relação entre a posição final atingida e a tensão de armadura aplicada em regime permanente. Esse parâmetro depende da constante de torque e da constante de força contraeletromotriz do motor; e T_m corresponde à constante de tempo eletromecânica, que reflete a inércia do rotor e o atrito viscoso do sistema, determinando a rapidez da resposta dinâmica.

3.1.2. Encoder

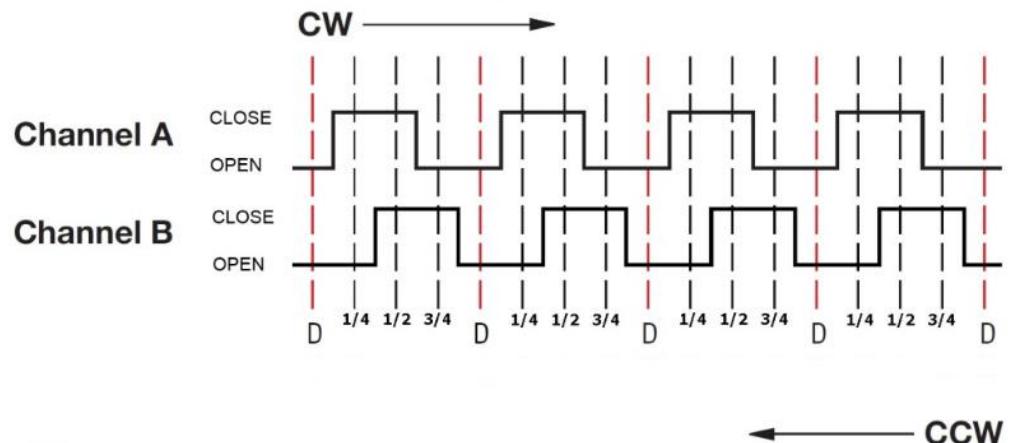
Segundo Cravo (2024), encoder é um dispositivo eletrônico responsável por converter movimentos rotacionais ou lineares em pulsos elétricos, fornecendo um feedback preciso de posição ou velocidade. Existem dois principais tipos de encoders: incrementais e absolutos.

O encoder incremental gera pulsos elétricos proporcionais à rotação do eixo, permitindo calcular deslocamento e velocidade com base na contagem de pulsos em um determinado intervalo de tempo.

O encoder absoluto fornece um código digital único para cada posição do eixo, permitindo determinar a posição exata mesmo após desligamentos do sistema.

Neste projeto, o motor DC está acoplado com um encoder de quadratura, que consiste em um encoder incremental com dois canais A e B, que geram sinais de onda quadrada defasados em 90° elétricos entre si, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Sinal de Quadratura



Fonte: Mokka Sensors (2023)

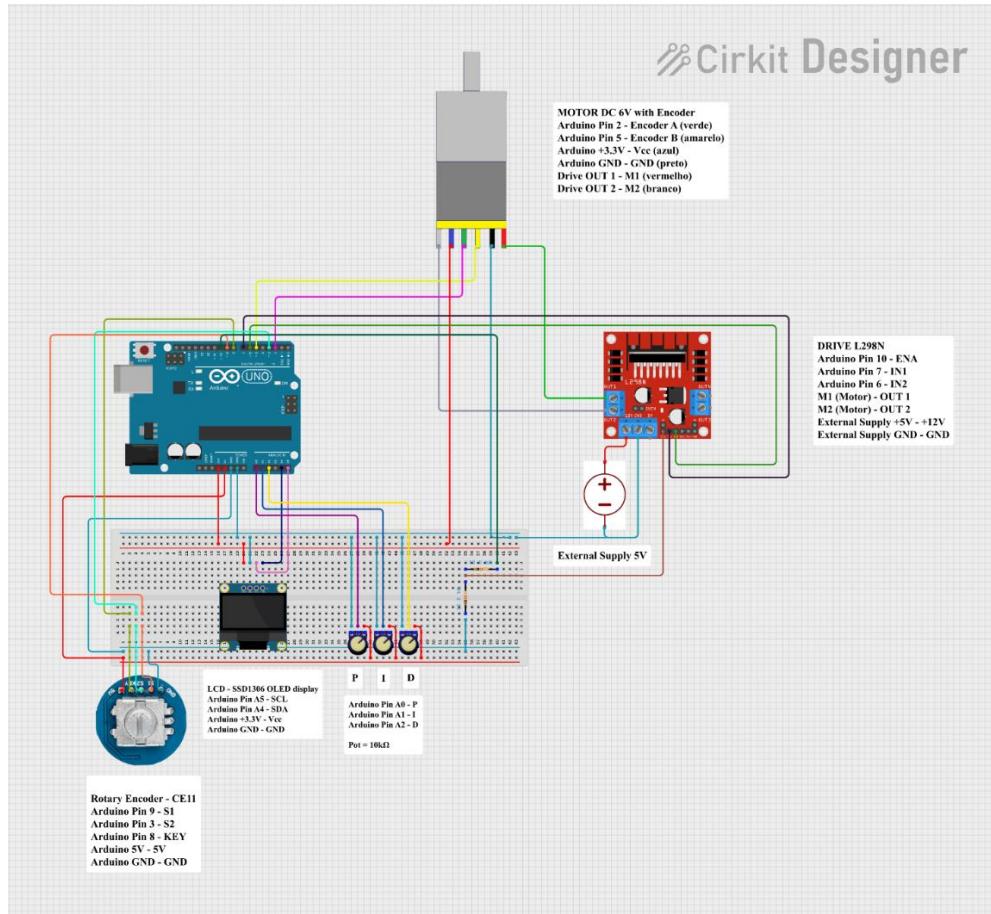
3.1.3. Arduino

A programação e a implementação do controlador serão através do Arduino que “é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software fáceis de usar” (ARDUINO, 2021). O Arduino possui um ambiente de desenvolvimento integrado (Arduino IDE) que utiliza uma linguagem simplificada derivada de C/C++, o que facilita a programação e a implementação de algoritmos de controle, como o PID. Além disso, a placa possui pinos de entrada e saída digitais e analógicos, interfaces de comunicação serial, I²C e SPI, tornando-a uma ferramenta versátil para aplicações acadêmicas e experimentais. No contexto de sistemas de controle, o Arduino atua como a unidade de processamento central, responsável por realizar a leitura dos sensores, calcular o erro em relação ao valor de referência e gerar o sinal de controle que será aplicado ao atuador, permitindo a operação em malha fechada com baixo custo e alta eficiência.

3.2. Levantamento prático

O projeto proposto tem como objetivo o desenvolvimento e implementação de um sistema de controle de posição para um motor de corrente contínua (DC) com encoder, utilizando a plataforma Arduino e um controlador PID (Proporcional–Integral–Derivativo).

Figura 6 - Circuito montado no Cirkit Designer



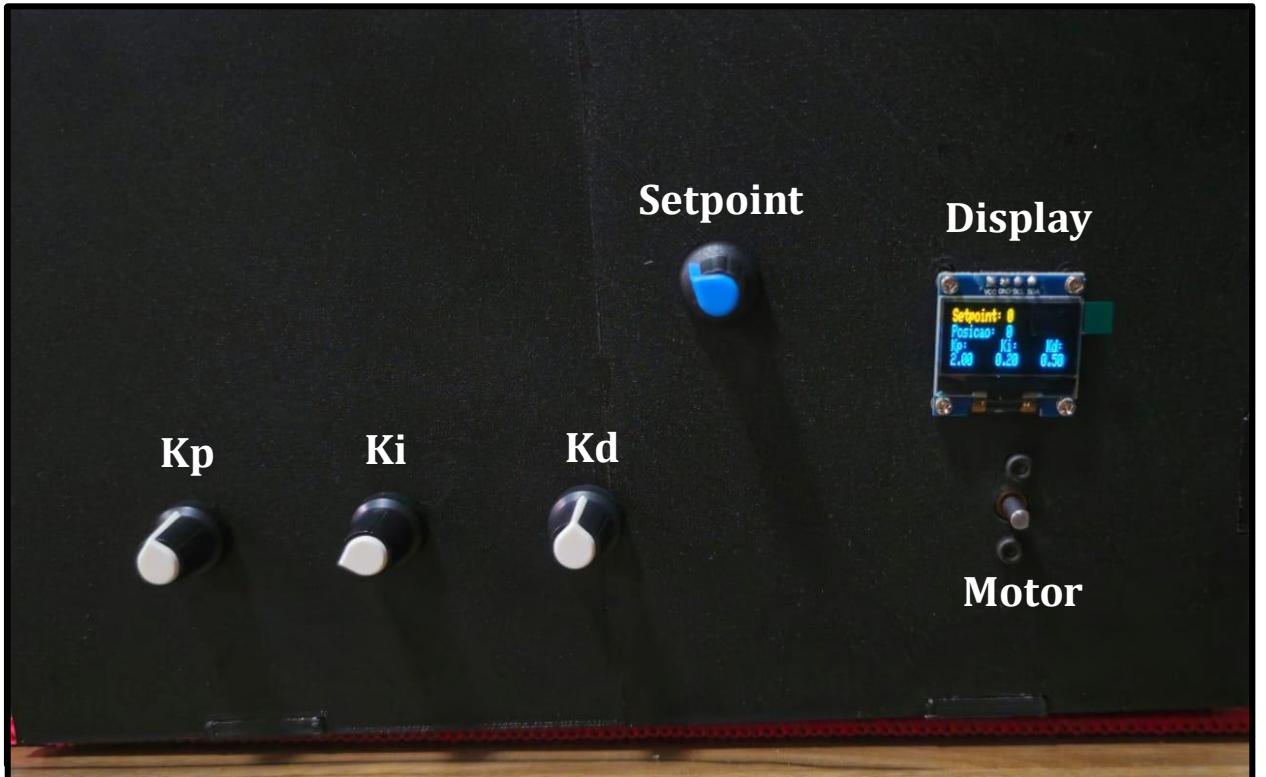
Fonte: Autoria própria (2025)

O sistema consiste em um motor DC com encoder integrado que possui a função de enviar pulsos para o Arduino para a identificação da posição do mesmo. Para o controle do motor foi escolhido a ponte H L298N, que é responsável por converter os sinais de controle de baixa potência recebidos pelo microcontrolador em sinais de potência capaz de acionar o motor no sentido necessário.

Para a identificação dos valores do PID, *setpoint* e posição atual do motor foi utilizado um display OLED. O valor do *setpoint* é obtido por meio de um potenciômetro com encoder e com um pulso faz com que o motor busque o valor desejado.

Realizado os testes do circuito em protoboard, foi projetada a estrutura física que iria conter os componentes. Para isto, a impressão 3D se mostrou uma alternativa compatível para a aplicação, utilizando o Prusa Slicer foi possível projetar a base para a impressão. Os ganhos foram limitados , onde K_p pode ser ajustado de 0 a 5, K_i pode ser ajustado de 0 a 2 e K_d pode ser ajustado de 0 a 1.

Figura 7 – Painel frontal do projeto físico



Fonte: Autoria própria (2025)

3.3. Programação

Para a realização da programação é necessário testar todos os componentes anteriormente para garantir seu funcionamento. Neste caso, o motor é o componente principal, para isso, foram realizados testes apenas para verificar a contagem do encoder e após isso implementado a ponte H para o controle do mesmo. O motor correspondeu aos testes tanto em relação a velocidade quanto a posicionamento.

Para criar uma função de cálculo de PID, é preciso primeiramente definir a fórmula geral como base

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

em que $u(t)$ é o sinal de controle aplicado ao atuador, $e(t)$ é o erro entre o valor desejado e o medido, K_p é o ganho proporcional, K_i é o ganho integral e K_d é o ganho derivativo. Observa-se que o termo proporcional reage instantaneamente ao erro, o integral acumula erros passados corrigindo o erro estacionário, e o derivativo antecipa variações rápidas, reduzindo oscilações. Esse modelo é ideal em sistemas analógicos, nos quais o tempo é tratado como uma variável

contínua e as operações de integração e derivação podem ser realizadas fisicamente por meio de circuitos RC e amplificadores operacionais.

Para exibir informações do sistema, como o *setpoint* e a posição atual do motor, foi implementado um display OLED integrado ao circuito. Para o funcionamento do display, foram utilizadas as bibliotecas Wire.h, SSD1306Ascii.h e SSD1306AsciiWire.h, que fornecem funções prontas para comunicação e escrita de dados na tela.

A comunicação entre o Arduino e o display OLED é realizada por meio do protocolo I²C (Integrated Circuit), no contexto do projeto, o uso do protocolo I²C proporciona uma transmissão eficiente e estável de informações entre o microcontrolador e o display, garantindo uma atualização precisa dos valores exibidos durante a operação do sistema de controle.

Com o conjunto em funcionamento, os dados foram enviados por meio da ferramenta Better Serial Plotter para criação de gráficos em tempo real medindo a posição do motor, *setpoint* e seu erro. Para a coleta de dados foram definidos manualmente os valores das variáveis proporcional, derivativo e integral. Os dados obtidos exemplificam o comportamento de um controlador proporcional (P), controlador proporcional-derivativo (PD), controlador proporcional-integral (PI), controlador proporcional-integral-derivativo (PID).

4. Resultados

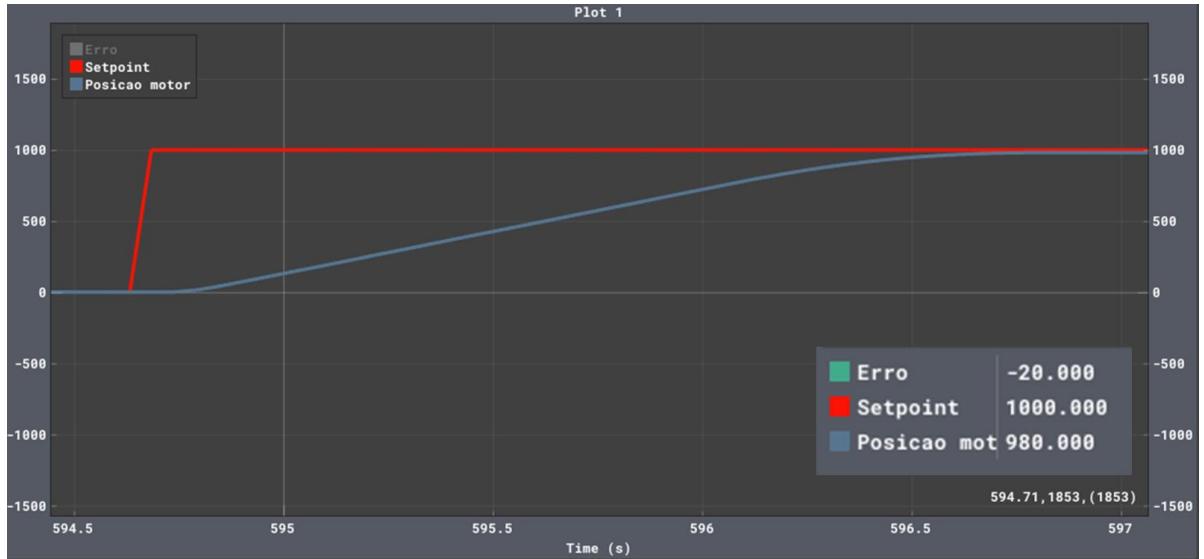
Nesta seção são apresentados os resultados experimentais obtidos a partir da implementação do sistema de controle de posição utilizando os controladores P, PI, PD e PID. O objetivo principal desta etapa é avaliar o desempenho do algoritmo de controle diante das variações e acrescento das variáveis, mantendo sempre o *setpoint* neste caso 1000.

Para a validação do controlador, foram realizados testes práticos com diferentes valores de ganhos proporcionais, integrais e derivativos (K_p , K_i e K_d), buscando identificar a estabilidade, tempo de resposta e erro em regime permanente. Os dados coletados foram obtidos por meio do Serial Plotter que compara o *setpoint* com a posição real do motor ao longo do tempo.

4.1.1. Controlador P (Proporcional)

Neste caso os parâmetros foram ajustados para $K_p = 1,00$. Na Figura 8, o sistema demonstra uma curva de subida amortecida e um tempo de acomodação 2,1 segundos. Porém, a posição final do motor não atinge exatamente o valor desejado incidindo em um erro de regime permanente.

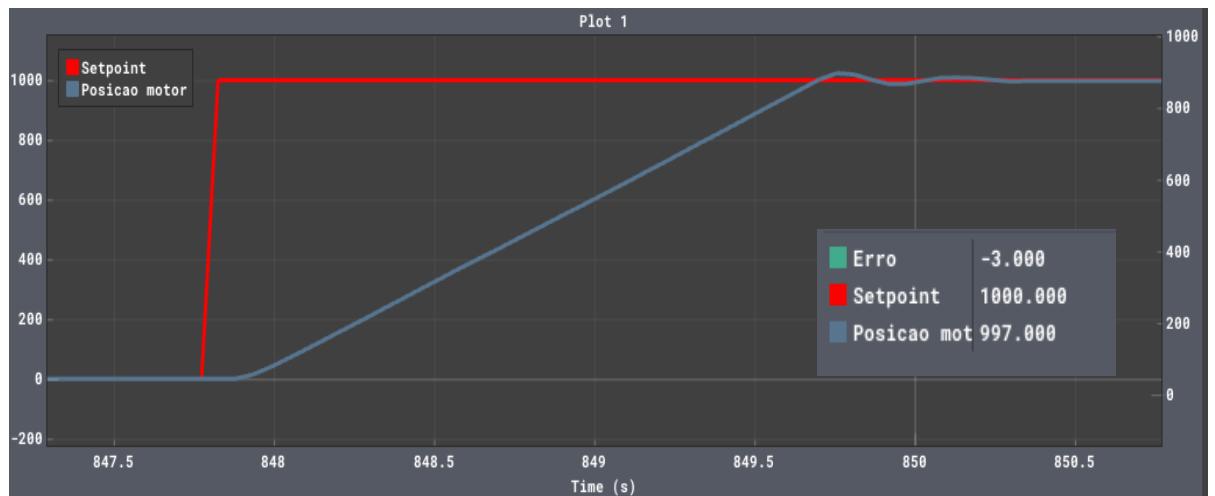
Figura 8 - Valores obtidos de posição e erro de regime permanente para um SP de 1000.



Fonte: Autoria própria (2025)

Neste caso os parâmetros foram ajustados para $K_p = 10,0$ (Figura 9). Com o aumento do ganho K_p , o sistema apresentou uma oscilação perto do *setpoint* e com isso um *overshoot* de 2,30%. O tempo de acomodação houve uma mudança mínima em relação ao anterior (Figura 8) de 1,1 segundos, mas em compensação o erro foi mínimo.

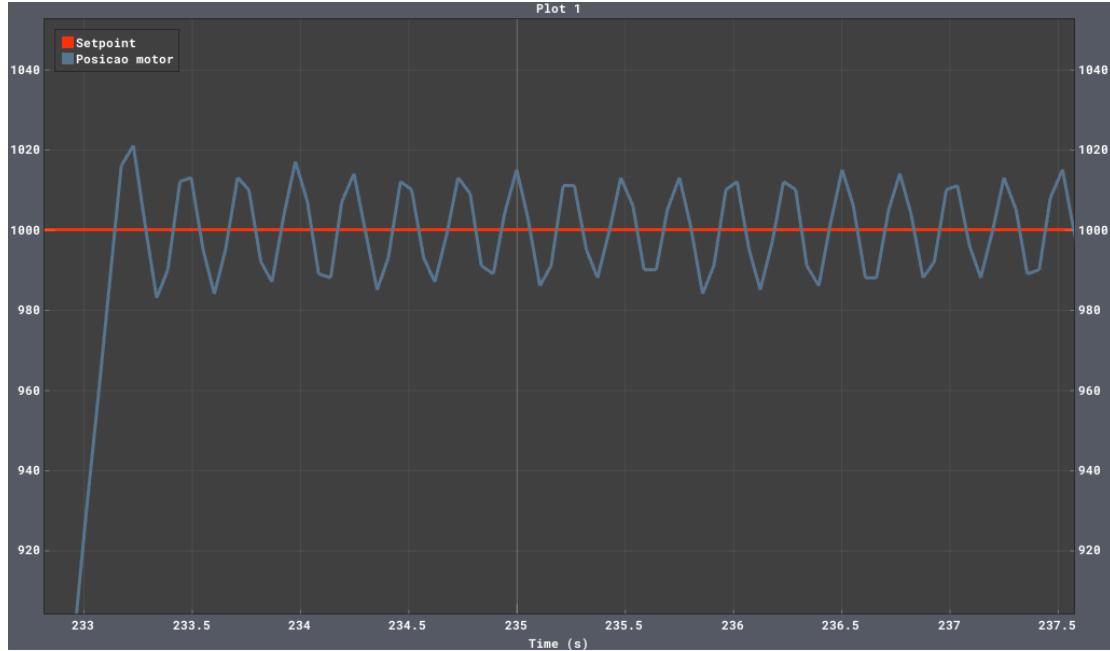
Figura 9 - Valores obtidos de posição e erro de regime permanente para um SP de 1000.



Fonte: Autoria própria (2025)

Neste caso os parâmetros foram ajustados para $K_p = 20,0$. O aumento do ganho proporcional incide em um *overshoot* de 2,10% e um sistema instável, como visto na Figura 10.

Figura 10 - Valores obtidos de posição e erro de regime permanente para um SP de 1000.

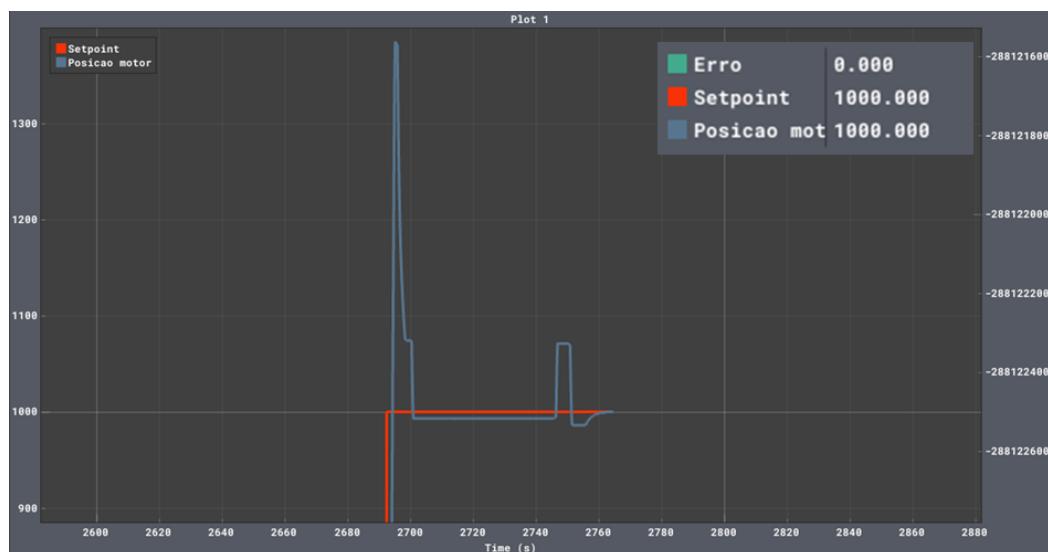


Fonte: Autoria própria (2025)

4.1.2. Controlador PI (Proporcional-Integral)

Neste caso os parâmetros foram ajustados para $K_p = 1,00$ e $K_i = 0,50$ e os resultados estão na Figura 11. Verifica-se que o sistema apresenta um *overshoot* de 38,5%, após isso apresenta uma oscilação antes de atingir o valor desejado, com um tempo de acomodação de 69,85 segundos. Com o termo integral o erro de regime permanente é eliminado, como observado no sistema, mas o tempo de acomodação e *overshoot* observados aumentaram consideravelmente.

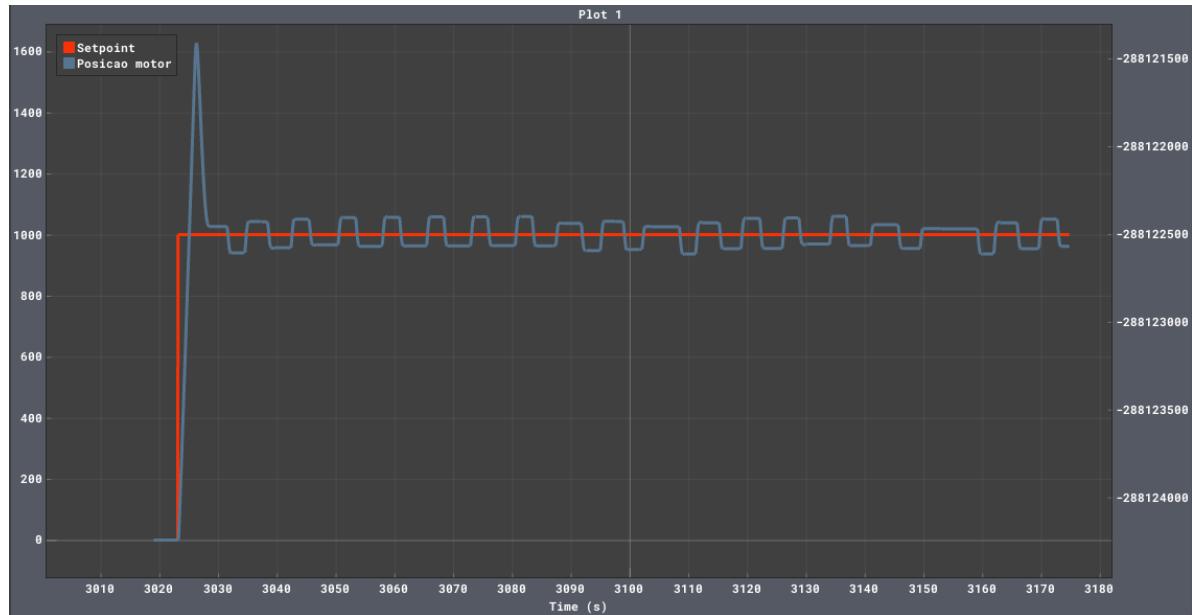
Figura 11 - Valores obtidos de posição e erro de regime permanente para um SP de 1000.



Fonte: Autoria própria (2025)

Neste caso os parâmetros foram ajustados para $K_p = 1,00$ e $K_i = 1,00$. O aumento do ganho integral resultou em um *overshoot* de 62,80% e um sistema instável, como visto na Figura 12. Nesta condição, o erro de regime permanente não foi zero e a posição do motor oscilou ao redor da posição desejada.

Figura 12 - Valores obtidos de posição e erro de regime permanente para um SP de 1000.

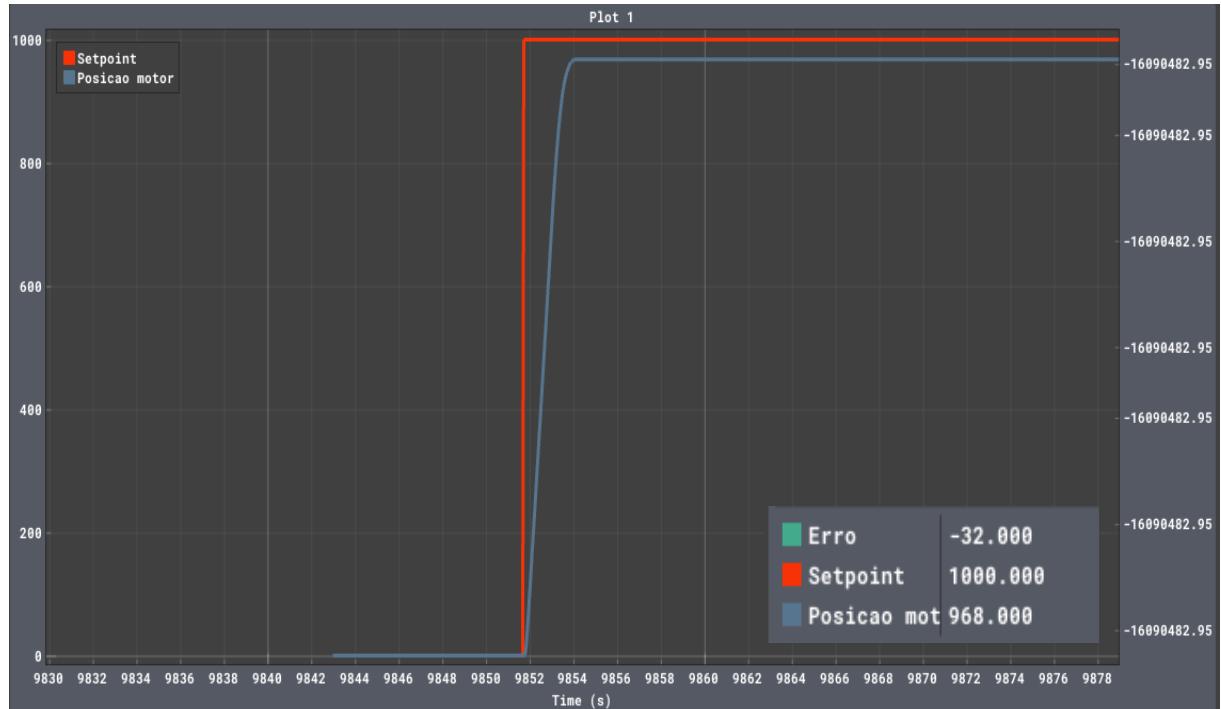


Fonte: Autoria própria (2025)

4.1.3. Controlador PD (Proporcional-Derivativo)

Como este motor é um sistema do tipo 1, isto é, já possui um polo na origem e deve apresentar erro de regime permanente nulo para uma entrada degrau, optou-se por testar e verificar o comportamento deste sistema usando um controlador PD (Proporcional-Derivativo). Neste caso os parâmetros foram ajustados para $K_p = 1,00$ e $K_d = 0,10$, o sistema demonstrou um excelente desempenho transitório (Figura 13), com uma resposta extremamente rápida e completamente amortecida, obtendo um tempo de acomodação de 2,5 segundos. Entretanto, o acréscimo do termo derivativo resultou em um erro estacionário de 3,20%.

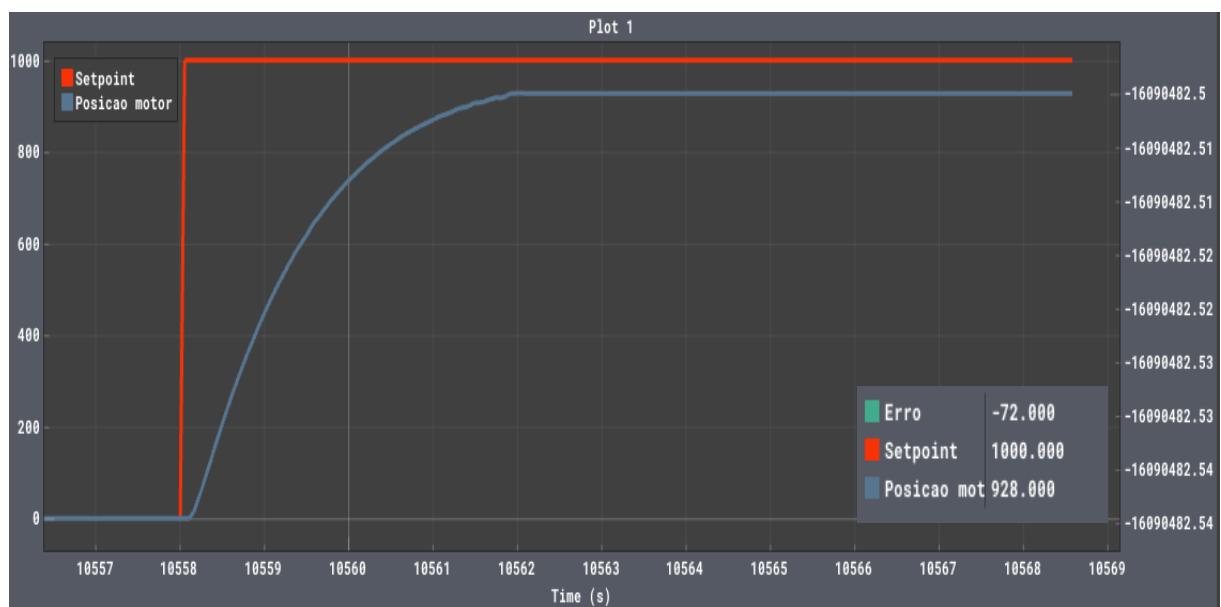
Figura 13 - Valores obtidos de posição e erro de regime permanente para um SP de 1000.



Fonte: Autoria própria (2025)

Neste caso os parâmetros foram ajustados para $K_p = 1,00$ e $K_d = 1,00$. Observe na Figura 14 que o sistema apresenta o erro em regime permanente maior em relação a Figura 13, obteve um tempo de acomodação de 4,08 segundos e um erro de regime permanente maior que no caso anterior (7,2%).

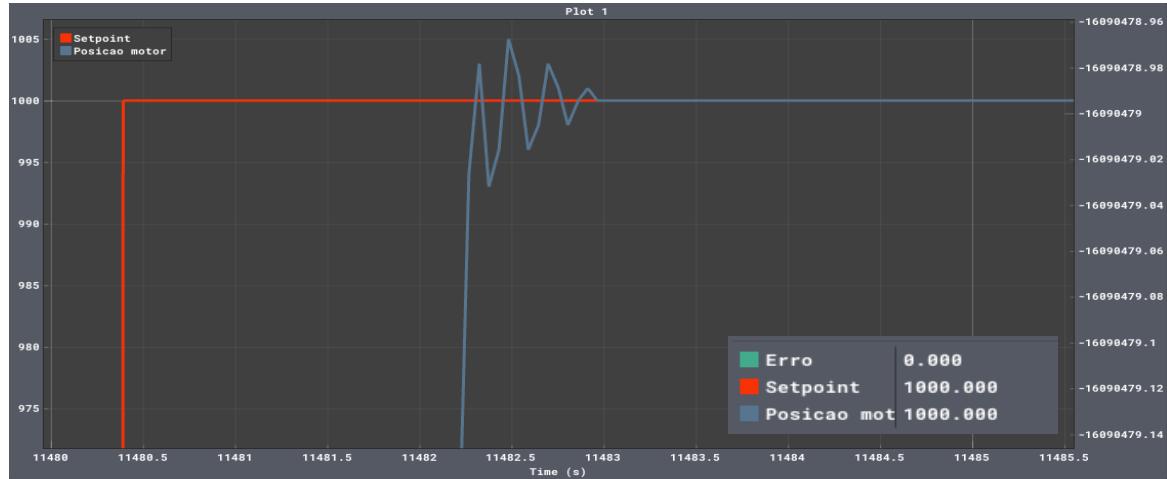
Figura 14 - Valores obtidos de posição e erro de regime permanente para um SP de 1000.



Fonte: Autoria própria (2025)

Os parâmetros foram ajustados para $K_p = 15,00$ e $K_d = 0,50$ e o sistema atingiu o *setpoint* com um tempo de acomodação de 2,565 segundos, porém apresenta oscilações significativas ao redor da referência atingindo um *overshoot* de 0,50% (Figura 15), indicando um aumento do amortecimento, mas ainda insuficiente para eliminar completamente o comportamento oscilatório. Neste caso o erro de regime permanente foi nulo.

Figura 15 - Valores obtidos de posição e erro de regime permanente para um SP de 1000.

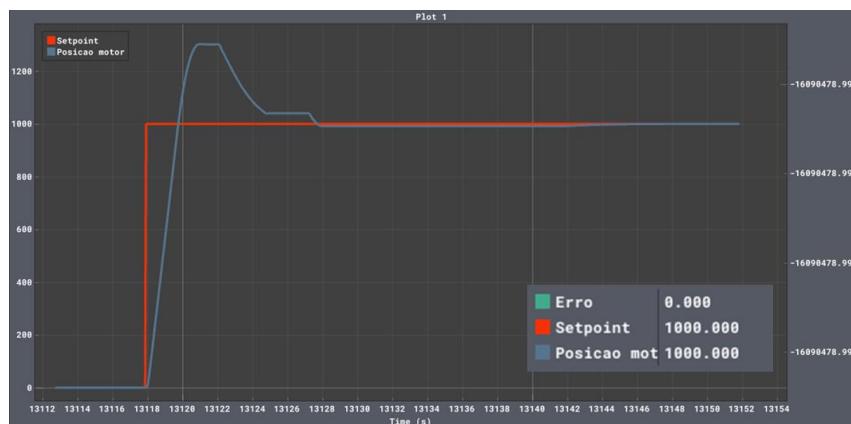


Fonte: Autoria própria (2025)

4.1.4. Controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo)

Por fim, foi testado e verificado o comportamento deste sistema com um controle PID. Os parâmetros foram ajustados para $K_p = 1,00$, $K_i = 0,50$ e $K_d = 0,50$. Na Figura 16, verifica-se que o sistema causa um *overshoot* de 30,2% antes de estabilizar com o tempo de acomodação de 29,568 segundos. Com o termo integral, o erro de regime permanente é nulo e o termo derivativo garante oscilações suaves até atingir o *setpoint* definido.

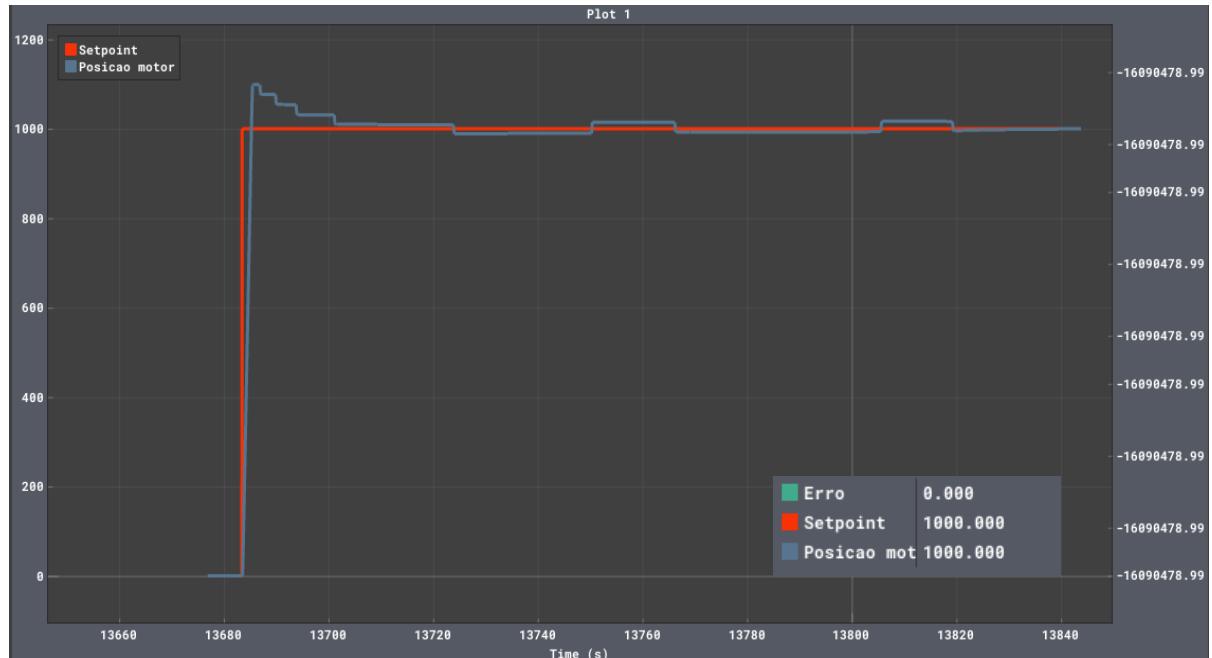
Figura 16 - Valores obtidos de posição e erro de regime permanente para um SP de 1000.



Fonte: Autoria própria (2025)

Neste caso os parâmetros foram ajustados para $K_p = 5,0$, $K_i = 0,50$ e $K_d = 0,20$. Em relação a sintonia anterior (Figura 16), uma melhora do *overshoot* que é de 10% em relação ao *setpoint*, porém, o tempo de acomodação de 155,95 segundos, demonstra a dificuldade e a oscilação que o sistema sofreu antes de eliminar o erro em regime permanente.

Figura 17 - Valores obtidos de posição e erro de regime permanente para um SP de 1000.



Fonte: Autoria própria (2025)

4.1.5. Análise comparativo das respostas dos controladores

A análise das respostas experimentais obtidas com os controladores P, PI e PID evidencia claramente a influência de cada ação de controle sobre o comportamento dinâmico do sistema de posicionamento do motor DC. É importante ressaltar que este sistema é do tipo 1, isto é, já possui um polo na origem e deve apresentar erro de regime permanente nulo para uma entrada degrau.

No controle proporcional P, observou-se que o sistema apresentou uma resposta estável e com tempo de subida satisfatório, respondendo rapidamente à variação do *setpoint*. Entretanto, apresentou um erro estacionário residual e ao aumentar o ganho para $K_p = 20,0$ o sistema se tornou instável. .

Com o controlador PI, o acréscimo do polo em zero torna o sistema em tipo 2, que também possui erro de regime permanente nulo para entrada degrau. Contudo, isso resultou em um

aumento considerável do *overshoot*, um tempo de acomodação mais longo e um sistema de maior tendência a instabilidades (quando $K_i = 1,0$, por exemplo).

Na primeira sintonia do controlador PD, o sistema demonstrou excelente desempenho transitório, exibindo uma resposta rápida, estável e completamente amortecida, entretanto, mesmo com o bom comportamento transitório, foi registrado um erro de regime permanente.

Porém, ao aumentar o ganho proporcional e o ganho derivativo do sistema ($K_p = 15,00$ e $K_d = 0,50$), houve uma oscilação no início da curva, mas logo atingiu o *setpoint*. Isto comprova a teoria que o sistema de um motor DC é tipo 1, porque neste controlador PD não foi necessário incluir uma variável integral para eliminar o erro de regime permanente.

Por fim, o controlador PID apresentou oscilações para chegar ao *setpoint*, o tempo de acomodação não demonstrou melhora em relação aos outros controladores.

5. Conclusão

O desenvolvimento do sistema de controle PID aplicado ao motor DC demonstrou, na prática, a importância dos conceitos teóricos de controle automático para a formação em engenharia. Através da implementação no Arduino, foi possível compreender o funcionamento de cada parâmetro do controlador e como sua variação influencia diretamente o comportamento dinâmico do sistema. Além disso, o projeto mostrou-se eficaz como ferramenta didática, permitindo aos estudantes visualizarem, de forma interativa, os efeitos do controle sobre o motor e consolidando o aprendizado dos conceitos de automação industrial.

Embora o sistema analisado do motor DC apresente uma ação integradora inerente, o que implicaria erro estacionário nulo para entradas do tipo degrau, na prática observou-se a presença de erro residual quando utilizado apenas o controle proporcional. Isso ocorre porque o sistema real apresenta efeitos não lineares, como atrito estático, perdas no drive (L298N), zona morta do atuador e saturação do motor, que impedem que pequenas variações de tensão gerem movimento. Assim, o controlador proporcional não é capaz de compensar completamente essas perturbações. Portanto, a inclusão da ação integral nos controladores PI ou PID permitem acumular o erro ao longo do tempo e fornecer a energia necessária para vencer o atrito e eliminar o erro estacionário, tornando o sistema mais preciso, entretanto, com esta inclusão o sistema se demonstrou mais instável se fazendo necessário utilizar para este modelo o controlador PD que atingiu dados consideráveis, respondendo melhor ao erro de regime permanente e tempo de acomodação.

O protótipo desenvolvido oferece um recurso acessível e funcional para o ensino, contribuindo para o aprimoramento das disciplinas voltadas à instrumentação e controle de processos. Dessa forma, o estudo não apenas atingiu seus objetivos técnicos e educacionais, mas também promoveu a valorização da experimentação prática como instrumento de aprendizagem significativa.

Para acesso aos dados do projeto mais detalhado, consultar o link do GitHub:
<https://github.com/Andre-Sanches/SISTEMA-DE-CONTROLE-PID>

REFERÊNCIAS

ARDUINO. **What is Arduino?** Arduino, 15 Setembro 2021. Disponível em:
<<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction/>>. Acesso em: 09 Outubro 2024.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. **The future of PID control.** [S.l.]: Control Engineering, 2001.

CAMPOS, M. C. M. M. D.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais.** São Paulo: Blucher, 2006.

CRAVO, E. **Encoder: quando utilizar, como funciona e muito mais.** Kalatec, 2024. Disponível em:
<<https://blog.kalatec.com.br/encoder/>>. Acesso em: 07 Novembro 2024.

CRAVO, E. **Controle PID em servos motores: saiba o que é qual a importância.** Kalatec, 2025. Disponível em: <<https://blog.kalatec.com.br/controle-pid/>>. Acesso em: 25 Janeiro 2025.

FERNANDES, D. D. A.; LOPES, B. H.; DALTON, A. D. A. **A utilização de um sistema de controle de temperatura de fácil construção para ensino prático nas disciplinas de engenharia elétrica.** Abrange, 2023. Disponível em: <https://admin.abenge.org.br/public/conteudo/artigo?cod_trab=4311>. Acesso em: 07 Novembro 2024.

LAMB, F. **Automação industrial na prática.** Porto Alegre, RS: AMGH, 2015.

MOKKA SENSORS. **Visão geral sobre encoders de quadratura.** Mokka Sensors, 2023. Disponível em:
<<https://mokka-sensors.com.br/encoders-de-quadratura-mokka/>>. Acesso em: 09 Outubro 2024.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle.** 6^a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno.** 5^a. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

YAMAKAMI, L. **Os setores mais afetados pela escassez de mão de obra qualificada.** Veja Negócios, 2025. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/economia/os-setores-mais-afetados-pela-escassez-de-mao-de-obra-qualificada/>>.