

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

ASPECTOS PRÁTICOS NO PROJETO DE CONTROLE PID DE VELOCIDADE ANGULAR EM MOTOR ELÉTRICO

**Marcos Paulo Rizzi dos Santos, Daniel da Silva Caubianco, Carlos Eduardo
Gomes, Anderson Kenji Hirata.**

Instituto Federal de São Paulo, Rodovia Presidente Dutra, km 145, Jardim Diamante – 12223-01, São
José dos Campos-SP, Brasil, marcos.rizzi@aluno.ifsp.edu.br, anderson.hirata@ifsp.edu.br.

Resumo

O controle de servomecanismos se baseia em aplicar uma malha fechada na planta, de modo a controlar variáveis que normalmente envolvem o deslocamento angular e suas derivadas. O controlador PID é bem conhecido e muito utilizado na indústria, porém, a sintonia adequada dos parâmetros deste algoritmo para que a resposta do sistema possa atender os requisitos desejados de projeto, o que nem sempre pode ser realizada de forma empírica. Neste trabalho, é apresentado o projeto de um controlador PI utilizando ferramentas computacionais disponíveis no mercado, partindo de um modelo matemático que foi levantado a partir de ensaios em malha aberta na planta em consideração. Os aspectos práticos do projeto são apresentados e discutidos, de forma a fornecer a viabilidade do uso dessas ferramentas para se conseguir atingir a melhor sintonia para o controlador, antes de aplicá-la em testes reais.

Palavras-chave: Controle PID, Motor CC, MATLAB

Área do Conhecimento: Engenharia Mecatrônica

Introdução

O controle de servomecanismos é aplicado quando se deseja controlar variáveis de processo, tais como posição ou deslocamento angular e suas derivadas de um eixo rotativo, ou linear (Nise, 2017). Um dos atuadores mais usados nesse tipo de sistema é o motor elétrico, devido a sua facilidade de controle e capacidade para acionamento de cargas. O controle de velocidade desses motores é essencial para garantir a eficiência e a segurança das operações, e existem várias técnicas de controle de velocidade para motores elétricos, que são utilizadas em diversas aplicações industriais, comerciais e residenciais (Dias, et al., 2009). A escolha da técnica mais adequada depende do tipo de motor, da carga acionada, do desempenho desejado e das restrições de custo e espaço (Abe, 2003), como exemplo o controle de velocidade por realimentação é uma técnica que utiliza sensores para medir a velocidade do motor e ajustar a alimentação para manter a velocidade desejada (Namihana; Sato, 1999). O controle usando um inversor de frequência é altamente eficiente e precisa, permitindo controlar a velocidade do motor de forma suave e sem oscilações, já a técnica de controle de velocidade por tensão variável consiste em variar a tensão aplicada ao motor, de acordo com a frequência da alimentação, mantendo assim uma relação V/Hz constante (Urbano; Albuquerque, 1990).

O controlador PID é bem conhecido e muito utilizado na indústria, e pode ser encontrado como função em diversos controladores lógicos programáveis, instrumentos e SDCD na indústria, envolvem a interconexão de vários controladores e dispositivos de campo para monitorar e controlar diversos aspectos do processo. A sintonia adequada dos parâmetros deste algoritmo para que a resposta do sistema possa atingir todos os requisitos de projeto desejados, nem sempre pode ser realizada de forma empírica, isto é, métodos como tentativa e erro, devido a algumas plantas industriais possuírem riscos de segurança, além de custos e danos materiais que podem estar envolvidos durante a realização desse procedimento. Neste trabalho, é apresentado o projeto de um controlador PI utilizando ferramentas computacionais disponíveis no mercado, que permite projetar o sistema, através de cálculos e simulações. Os aspectos práticos do projeto são apresentados e discutidos, de forma a fornecer a viabilidade no uso dessas ferramentas para se conseguir atingir a melhor sintonia para o controlador, antes de aplicá-la em testes reais.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Metodologia

O arranjo experimental consistiu em um motor CC de 12V 3A acoplado a um eixo com carga. Para medir o deslocamento angular no eixo do motor, foi usado um encoder Omron modelo E6B2-CWZ6C com resolução de 2000P/R. Para o acionamento do motor foi usado um módulo de ponte H (BTS7960), com canais para acionar o motor através de PWM, além da troca de sentido de rotação. O algoritmo de controle foi aplicado em uma placa de desenvolvimento CX STECK - SEX231 com microcontrolador STM32F103C8T6. Para as simulações, análise e projeto, foi usado MATLAB® versão R2019a, e a ferramenta Control System Designer. Para a coleta de dados de entrada e saída foi utilizado software Coolterm®. Para validação dos gráficos de resposta temporal obtidos foi utilizado o Simulink®. O Arduino IDE foi utilizado para programar o microcontrolador colocando as variáveis de interesses na porta serial para respectiva leitura.

A obtenção da função de transferência da velocidade de um motor envolve a modelagem matemática da relação entre as variáveis de entrada e saída do sistema utilizando o operador matemático Transformada de Laplace para transformar a função linear temporal no domínio da frequência, considerando a dinâmica e as características específicas do motor, com isso determina-se a estrutura do modelo e a partir dos testes dinâmicos juntamente com a coleta de dados foi possível obter os parâmetros do modelo utilizando o método de identificação de Miller para sistemas de primeira ordem e então criar uma representação matemática do motor com a função de transferência.

Com o modelo validado, então é possível aplicar as técnicas de controle de malha fechada e controlador PID, para isso o sistema é carregado para dentro do MATLAB onde é feito o estudo com testes práticos e aplicando o controle para obter a resposta temporal desejada, estabelecendo critérios de overshooting e tempo de subida.

Para aplicar as técnicas de controle utilizou-se o lugar geométrico das raízes juntamente com a representação no tempo da resposta a um degrau unitário na entrada.

Resultados

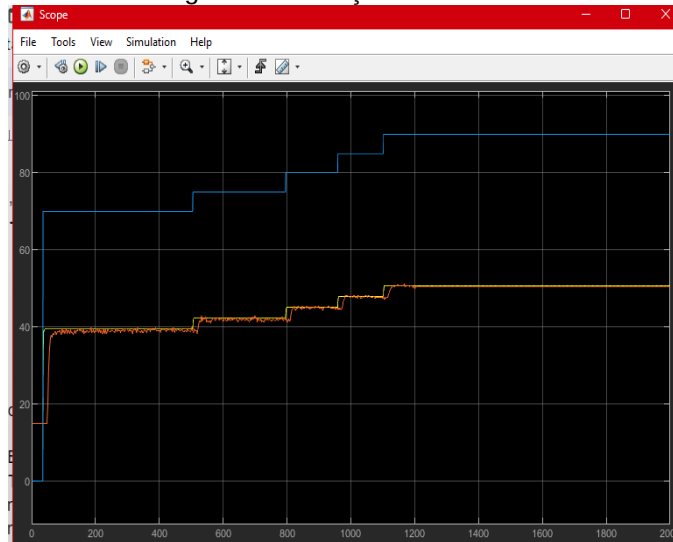
Ao usar a modelagem caixa branca, conhecendo a equação diferencial do sistema e aplicando o operador matemático da Transformada de Laplace com condições iniciais nulas se obtém a estrutura do modelo, para gerar o modelo é preciso juntar a estruturação realizada a partir do conhecimento a priori dos fenômenos físicos do sistema com a parametrização realizada aplicando valores de entrada e medindo a taxa de variação da posição do Motor CC, assim os parâmetros de ganho e constante de tempo foram obtidos, e o cálculo do modelo do Motor CC saída baseada na identificação de sistemas aplicada proporcionou a função de transferência de primeira ordem:

$$G(S) = \frac{0.564}{0.846s + 1}$$

Ao realizar a validação do modelo matemático proposto no MATLAB, o gráfico obtido comparando a entrada (cor azul), com a velocidade angular medida (cor laranja) e a velocidade angular do modelo em cor amarelo, tem-se:

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Figura 1: Validação do Modelo.



Fonte: Os Autores

Com a validação da função de transferência, aplicou-se a técnica de controle de malha fechada implementando a realimentação a partir do código aplicado ao microcontrolador juntamente com a adição do ganho proporcional ao controle e seu aumento gradativo para tentar-se obter o erro de regime permanente nulo. Então ao implementar um ganho de 25, aplicando degraus de 5% de Duty Cycle do PWM de amplitude cada atingiu-se o seguinte:

Figura 2: Teste em malha fechada.



Fonte: Os Autores

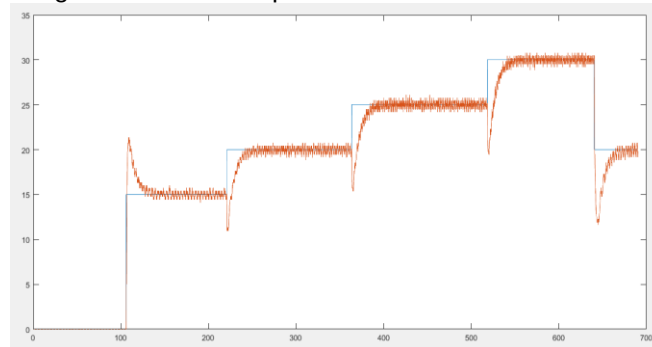
Contudo se faz necessária, a aplicação do controle PI para a eficiência prática da aplicação, com o Control System Designer gerando os gráficos da resposta em frequência e do lugar geométrico das raízes, com isso o método manual de controle foi aplicado inserindo um integrador e um zero real no LGR e observando-se a resposta temporal a um degrau unitário simultaneamente.

A proposta é obter o erro de regime permanente nulo, sem overshooting e com a resposta mais rápida possível.

Para aplicar os parâmetros de controle obtidos, fez-se necessário os cálculos e a implementação deles no código do microcontrolador, contudo quando aplicado os valores na prática e coletando os dados utilizando o Coolterm o resultado divergiu do esperado apresentando um sobressinal indesejado.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

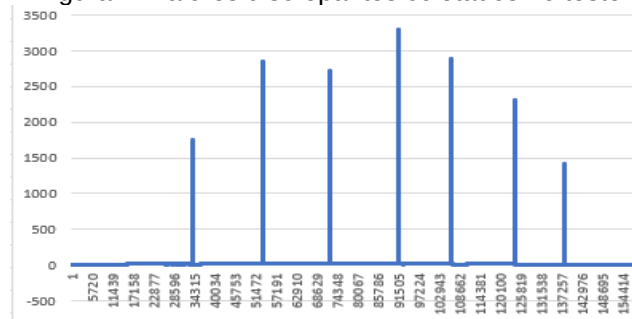
Figura 3: Resultado primeiro teste dinâmico com PI.



Fonte: Os Autores.

Então investigou-se a causa raiz deste resultado, utilizando-se para isso a análise das amostras coletadas nos ensaios dinâmicos onde se observou uma anomalia no valor do sinal lido da velocidade do motor.

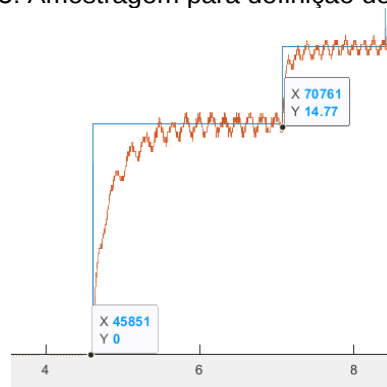
Figura 4: Valores discrepantes coletados no teste.



Fonte: Os Autores

Ao comparar os sinais de picos entre cada variação da entrada é notável que o software interpretou a unidade de medida com duas casas decimais adicionais, assim mascarando o resultado real. Para conseguir então medir a taxa de variação da posição do Motor CC sem comprometer seu valor real foi utilizado a porta serial do microcontrolador para obter os valores da entrada e saída, com isso foi preciso adaptar ao período de amostragem do software. Para determinar a frequência do sinal de amostra coletado obteve-se um valor aproximado de 3 segundos, então a quantidade de amostras entre os degraus foi de:

Figura 5: Amostragem para definição de período.

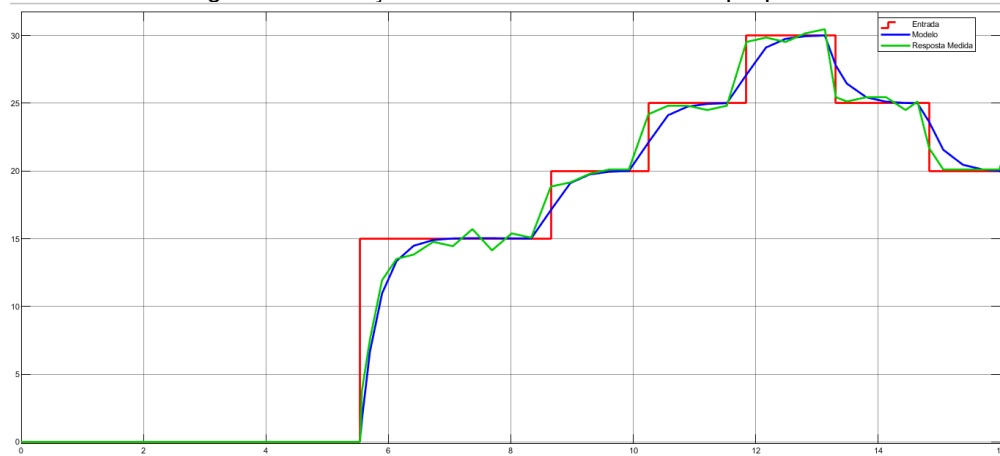


Fonte: Os Autores.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Então o período é de $T = [3 / (70761 - 45851)] = 120 \mu s$ para cada amostra, logo os novos testes dinâmicos e coleta de dados resultou positivamente, com isso utilizando a função de transferência e bloco de controle presente no Simulink, obteve-se a validação dos dados medidos com os valores gerados pelo modelo proposto juntamente com o controle calculado no Control System Designer.

Figura 6: Validação do modelo de controle PI proposto.



Fonte: Os Autores

Discussão

Nessa perspectiva, partindo do princípio de modelagem branca onde o embasamento teórico foi fundamentado e desenvolvido, concluiu-se que o sistema apresenta um comportamento de elemento de atraso de transferência, ou seja, um sistema de primeira ordem, onde a simulação pode confirmar isso, a modelagem adotada foi um método determinístico para se definir os parâmetros de ganho e constante de tempo para o modelo, logo foi obtida a função de transferência apresentada, nota-se um offset de medições entre o sinal de saída verdadeiro e o sinal de saída simulado, isso ocorre por conta do “pulo” de degrau ao qual o Simulink realiza, pois fisicamente os dados coletados partiram de um degrau não nulo, então como a análise feita foi apenas para uma determinada região de linearidade, o gráfico possui a validação do modelo a partir do instante 200, logo é possível concluir que o modelo paramétrico estimado para o sistema de primeira ordem conseguiu representar o comportamento do sistema dentro dessa região estabelecida.

Define-se por estabilidade todo o sistema que converge para uma resposta finita dentro de um tempo finito ao aplicar uma entrada finita, dentro disso o segundo experimento busca a aplicação da técnica de realimentação da saída na entrada, logo ao fazer isso tanto para a programação do microcontrolador quanto para o modelo obtido, com isso busca-se agora encontrar valores de ganho proporcional que anulem o erro de regime estacionário do sistema, então após encontrar a função de malha fechada $T(S)$ é possível mapear o comportamento do sistema com a variação do ganho, uma vez que o sistema possui um polo no semiplano esquerdo do plano s e esse mesmo polo tende ao zero infinito encontrado na parte infinita da esquerda do gráfico, então para quaisquer valores de K o modelo do sistema tende a estabilidade, mas quanto ao sistema real pode-se confirmar isso em partes, devido às limitações físicas do sistema como por exemplo: corrente máxima aplicada que está proporcionalmente relacionada como visto na modelagem de caixa branca, o ganho do sistema não chega nem perto de infinito, além de que há uma limitação mecânica de sua estrutura ao todo que não permite com que o sistema responda a altíssimas velocidades, que levaria a autodestruição do sistema por exemplo, também é visto que o erro de regime permanente não foi totalmente corrigido mas comparando com o sinal de saída obtido no primeiro experimento é notável a diferença pois agora há um sinal de erro emitido pela diferença entre o setpoint e o sinal de saída medido, isso ocorreu por motivos de dinâmicas aproximadas do sistemas, ou seja, o encoder está realizando a leitura de posição em variação ao tempo de modo aproximado, não há uma leitura correta em cima da verdadeira velocidade angular, além disso deve ser considerado algumas possíveis não linearidades que modificaram o comportamento do

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

sistema, pois os testes foram realizados em dias diferentes, tempos de uso do motor diferentes, ou seja, aquecimento do motor, pode-se observar esse fenômeno principalmente quando está a muito tempo sem ligar o motor e ele tem que realizar um esforço maior para funcionar, assim como qualquer movimentação da bancada pode acabar eventualmente resultando em vibrações indesejadas, até mesmo perturbações podem ser consideradas nesse caso por conta da utilização do software Coolterm para medição das variáveis de saída.

Com isso observou-se um impasse na medição da velocidade do motor ao fazer a coleta de dados pelo CoolTerm devido o software interpretar a saída com duas casas decimais extras forçando um sinal de controle ao extremo na tentativa de corrigir imediatamente o sinal de erro gerado, logo a análise de causa raiz foi efetiva e a solução proposta sancionou o problema de medição utilizando a ideia proposta.

Tendo isso pode-se observar que o sistema anulou o erro de regime permanente do sistema com a adição da malha de controle, também é possível verificar a aproximação do comportamento da resposta transitória e o degrau aplicado, isso ocorre pela integrador adicionado ao sistema e a movimentação do polo real feita manualmente na parte de experimentação, é possível notar que com a aplicação do sinal de degrau maior e a saída da inércia do motor gerou uma resposta mais lenta, isso ocorre primeiramente por conta de ser a quebra da inércia, ou seja, todo objeto tende a ficar em repouso então as partes rotativas do motor requerem um torque significativo para começar a girar também o atrito estático entre as partes móveis do motor e a resistência ao movimento podem ser maiores quando o motor está parado e esse atrito estático precisa ser superado para iniciar o movimento, em segundo lugar ocorre do motor de saturação de tempo de sinais de comunicação entre computador, microcontrolador e sistema físico o que limita fisicamente o controle para se obter respostas mais rápidas.

Conclusão

Nessa perspectiva, entende-se que para a implementação prática de um controle PI -Proporcional-integrador no sistema de controle de velocidade é necessário realizar o passo a passo apresentado, ou seja, obter-se primeiramente uma modelagem em caixa branca preferencialmente para se ter uma noção física do comportamento do sistema ao longo do tempo, após isso é experimentar o sistema excitando-o com várias entradas de degraus diferentes no caso, verificar faixas de linearidade para funcionamento do modelo, entendendo as limitações físicas de saturação do sistema, a criação do modelo a partir de método determinístico, ou seja, sem considerar que os ruídos externos afetam o comportamento do sistema, assim então foi validado, então após a aplicação da técnica de malha fechada, a qual é necessária para que haja a geração do sinal de erro e durante a implementação do controle PI verificou-se que o sistema corrigiu o erro de regime estacionário como esperado e apresentou um tempo de resposta rápido conforme os critérios de projeto.

Referências

Abe, Kazuo. "Low-noise drive technology of Brushless motor", RENA No.163, pp.19-25 (2003)

Namihana, Koji; Sato, Masayoshi: "New control method of three-phase induction motor", RENA No.159, pp.23-28 (1999)

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

Dias, Samuel. **Controle de Velocidade de uma Correia Transportadora utilizando Controlador PI**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/170032/mod_folder/content/0/Controle%20de%20velocidade%20de%20uma%20correia%20transportadora.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2023.

Urbano, Pedro; Albuquerque, Carlos Anísio Gomes. **Controle de Velocidade em Motores CC**. Revista Tecnologia, 1990 Disponível em: <<https://ojs.unifor.br/tec/article/download/1349/4247>>. Acesso em 06 de Julho de 2023.