



Experimento Didático para Apresentação de Conceitos de Controle Empregando um Motor CC e uma Interface de Comando sem Fio

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.4996

Autores: LUAN MATEUS BOCALAN VOGAS, ANDERSON TIAGO DE MORAES, JOSE ROBERTO COLOMBO JUNIOR, ROBERTO KAWAKAMI HARROP GALVÃO, RUBENS JUNQUEIRA MAGALHÃES AFONSO

Resumo: Este artigo apresenta um sistema de laboratório que pode ser utilizado para ilustrar conceitos básicos de controle de sistemas dinâmicos com realimentação. A tarefa consiste em controlar a velocidade de um motor CC de porte industrial acoplado a um gerador CC. Perturbações podem ser introduzidas conectando o gerador a uma carga resistiva, o que aumenta a carga mecânica no eixo do motor. O ambiente Simulink foi utilizado para implementar uma lei de controle proporcional e para visualizar o sinal de referência, a velocidade medida e o controle em uma interface gráfica. O aparato computacional foi configurado para receber o sinal de referência de um dispositivo de comando sem fio, semelhante a um controle remoto, que pode ser operado pelos alunos. Empregando este sistema, as vantagens da operação em malha fechada são ilustradas em termos de melhor atenuação de perturbações e maior rapidez de resposta a comandos.

Palavras-chave: Ensino de engenharia de controle; controle proporcional; servomecanismo; controle de velocidade; motor de corrente contínua; interface homem-máquina.

Experimento Didático para Apresentação de Conceitos de Controle Empregando um Motor CC e uma Interface de Comando sem Fio

1 INTRODUÇÃO

A engenharia é uma profissão prática que tem por objetivo trabalhar os recursos disponíveis na natureza para melhorar a qualidade de vida das pessoas. Tão importante é a importância de conhecer as propriedades destes recursos naturais que, nos primórdios do ensino da engenharia, as aulas eram todas ministradas dentro de laboratórios (FEISEL; ROSA, 2005). Hoje em dia as aulas práticas dividem espaço com aulas teóricas, com as suas respectivas cargas horárias. No entanto, as estratégias e abordagens aplicadas dentro dos laboratórios sofreram alterações ao longo dos anos.

É consensual que estudantes mais motivados apresentam desempenho mais satisfatório (KUH, 2009). As aulas laboratoriais podem ser utilizadas para melhorar o engajamento e motivação dos estudantes com os seus respectivos cursos (SINGH et al., 2019). No entanto, um estudo recente indica que os estudantes preferem atividades virtuais em detrimento de projetos físicos (NOLEN; KORETSKY, 2018).

Sendo assim, este trabalho propõe a realização de uma demonstração de laboratório com um sistema físico conectado a um computador. Mais especificamente, a atividade proposta tem por objetivo familiarizar o estudante com conceitos básicos de controle de sistemas dinâmicos.

Como principais componentes do sistema desenvolvido destacam-se:

- um motor de corrente contínua (CC) de porte intermediário (1/4 [HP]), acionado com modulação por largura de pulso (*pulse width modulation*, PWM);
- um gerador CC empregado como carga mecânica variável;
- um dispositivo de comando sem fio para envio de referência ao sistema de controle de velocidade;
- uma interface gráfica para visualização dos sinais de referência, controle e velocidade medida.

Vale salientar que o motor foi escolhido para representar um sistema com características industriais, mas ainda com dimensões físicas e especificações elétricas adequadas para uso em um laboratório de sistemas de controle. Para fins didáticos, o sistema pode ser comparado ao aparato propulsivo de um carro elétrico, um tema atual e que vem sendo amplamente explorado nos últimos anos. Embora tais veículos frequentemente empreguem motores CC sem escovas, optou-se por utilizar motores CC convencionais devido à sua maior disponibilidade nas instituições de ensino. Na literatura existem diversos trabalhos nessa área, enfocando formas energeticamente mais eficientes de condução (FLEMING; MIDGLEY, 2023), desenvolvimento de sistemas autônomos de guiamento (MRIDUL et al., 2023) e novas formas de carregamento (RASTGOO et al., 2022; ZHAO, 2022), dentre outros tópicos. Essa analogia pode ser apresentada no início do experimento para contextualização do problema de controle considerado.

Como será relatado em mais detalhes ao longo deste artigo, o experimento foi planejado para ilustrar os principais elementos de um sistema de controle (planta, atuador, sensor, controlador) e também as vantagens da operação em malha fechada.

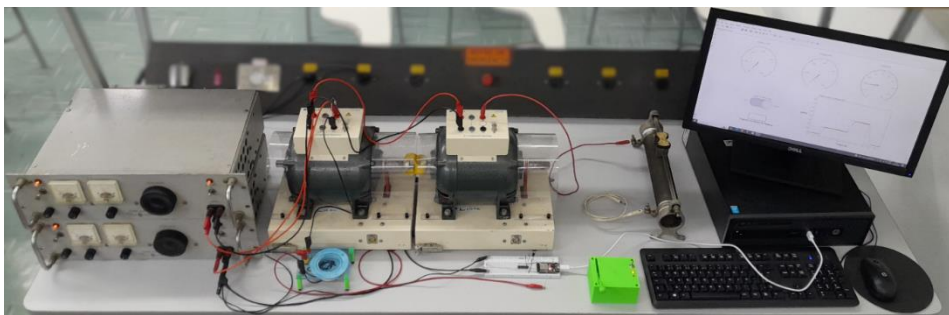
Notadamente, ilustra-se o papel da realimentação para proporcionar atenuação de perturbações e maior rapidez de resposta a comandos. Em particular, a interface homem-máquina compreendendo o dispositivo de comando sem fio e a tela de visualização de sinais permite que o estudante tenha uma percepção mais clara da operação do sistema e do efeito do fechamento e abertura da malha de controle. Nesse sentido, o uso de tal interface vai ao encontro de recomendações modernas de ensino de engenharia, que preconizam a valorização de experiências de interação homem-máquina-computador (GÜRDÜR BROO; KAYNAK; SAIT, 2022).

O restante do texto encontra-se organizado da seguinte forma. A Seção 2 descreve em detalhes os elementos do sistema proposto. A Seção 3 apresenta o procedimento de modelagem da planta e projeto do controlador. Resultados ilustrativos obtidos com o sistema em malha aberta e em malha fechada estão relatados na Seção 4. A seção 5 traz considerações finais a respeito do trabalho realizado.

2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Para a realização do experimento, montou-se a bancada apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Bancada experimental.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Essa montagem pode ser representada de forma equivalente através do diagrama de blocos mostrado na Figura 2, que compreende os seguintes elementos:

- (1) Planta: máquina CC [1/4 HP] operando como motor.
- (2) Atuador: circuito de potência empregando transistor MOSFET com modulação PWM.
- (3) Sensor: máquina CC de pequeno porte operando como gerador.
- (4) Perturbação: máquina CC [1/4 HP] operando como gerador, com carga elétrica ajustável.
- (5) Referência: interface de comando sem fio.
- (6) Controlador: microcontrolador ESP32 conectado a um computador com *software* MATLAB®.

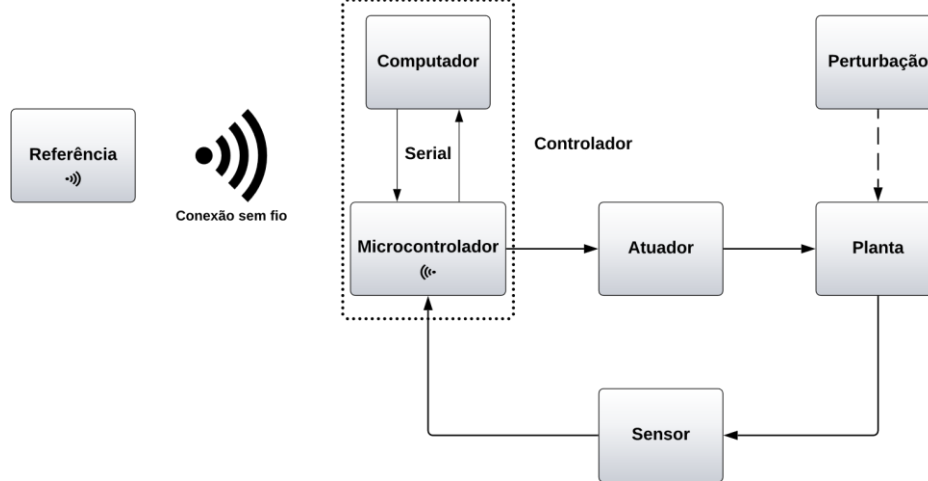
Esses itens encontram-se descritos de forma mais detalhada nas subseções a seguir (os arquivos e códigos utilizados estão disponíveis em um repositório no *GitHub* <https://github.com/labcontroleaerotronica/SBA12023.git>), e um breve vídeo do funcionamento do sistema está disponível no *YouTube* <https://youtu.be/cHY7G4wHNGg>.

2.1 Planta

A planta utilizada foi um motor CC de 1/4 [HP] com valores nominais de 120 [V] para tensão, 2,2 [A] para corrente e 2000 [RPM] para velocidade. Para alimentação foram utilizadas duas fontes ajustáveis independentes, ambas com especificações máximas de

60 [V] e 2,5 [A]. Uma das fontes foi ajustada para 23,5 [V] para alimentar o circuito de campo. A outra, para 49,5 [V], para alimentar o circuito de armadura, que é acionado por um atuador eletrônico.

Figura 2 - Diagrama de blocos do sistema.



Fonte: Elaborada pelos autores.

2.2 Atuador

Como atuador, foi utilizado um transistor de potência MOSFET IRF740, dotado de dissipador de calor, que foi inserido em série com o circuito de armadura do motor CC. Os pinos de *drain* e *source* do transistor foram conectados à armadura do motor e ao terminal negativo da fonte de alimentação, respectivamente. O pino de *gate*, por sua vez, foi conectado à saída do *buffer* (mencionado na Seção 2.6) do controlador. Para evitar um pico de tensão inversa, foi adicionado um diodo 1N4007 ligado de forma invertida, e em paralelo, com os terminais da armadura, que foi alimentada com um sinal PWM com frequência fixa de 100 [Hz], e ciclo de trabalho (*duty cycle*) ajustável entre 0 e 100 %.

2.3 Sensor

O sensor utilizado para medição da velocidade de rotação foi uma máquina CC de ímã permanente de pequeno porte, operando como gerador, com valores nominais de 12 [V] de tensão, 0,621 [A] de corrente e 2750 [RPM] de velocidade. Esse gerador foi acoplado ao eixo da planta, e os seus terminais de saída foram conectados ao circuito de conversão de tensão (mencionado na Seção 2.6) do controlador.

2.4 Perturbação

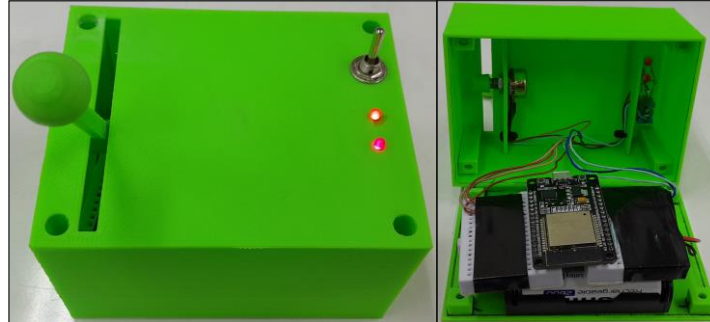
Para a introdução de perturbações, empregou-se uma segunda máquina CC de 1/4 [HP], que foi acoplada ao eixo da planta de modo a operar como gerador. O circuito de campo foi alimentado com a mesma tensão de campo da planta. A perturbação é introduzida conectando-se o circuito de armadura a uma carga resistiva de 44 [Ω]. Com isso, surge um torque eletromagnético no sentido contrário ao da rotação da máquina, acarretando uma redução na velocidade.

2.5 Referência

Para o envio de um sinal de referência de forma sem fio para o sistema de controle foi construído um dispositivo semelhante a um controle remoto, apresentado na Figura 3. Tal dispositivo possui em seu painel frontal uma chave para acionamento, uma alavanca para ajuste do sinal de referência e dois LEDs, um para indicar se o dispositivo está em funcionamento, e outro para representar a magnitude do sinal de referência que está

sendo enviado para o sistema de controle, proporcional à intensidade luminosa do LED. O dispositivo é alimentado por um conjunto de 4 pilhas AA de 2600 [mAh] recarregáveis ligadas em série. Em seu interior são utilizadas duas *protoboards* de 170 pontos para a montagem das conexões elétricas.

Figura 3 - Interface de comando sem fio.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Para realizar a conversão da posição angular da alavanca em um sinal elétrico, utilizou-se um potenciômetro conectado como divisor de tensão variável. A tensão de saída desse potenciômetro é lida através do conversor analógico-digital (AD) de um microcontrolador ESP32, que foi configurado para operar com uma resolução de 12 bits. Desse modo, o movimento da alavanca é convertido em um sinal na faixa de 0 a 4095, que é enviado via *Wi-Fi* para o controlador.

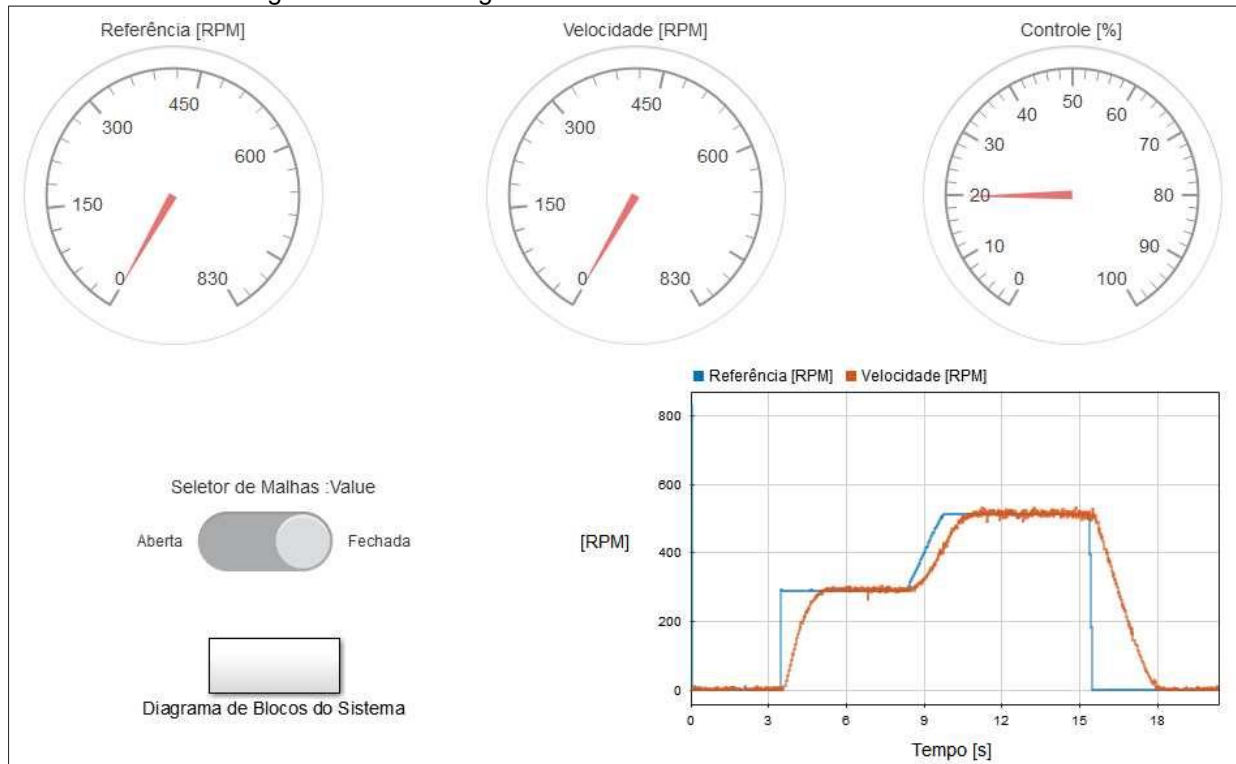
2.6 Controlador

O sistema de controle é formado por um microcontrolador ESP32, dois conversores de tensões e um computador com *software* MATLAB® R2016a. Na montagem realizada, o microcontrolador é responsável pela recepção do sinal de referência, leitura do sinal do sensor, e comando do atuador. O primeiro conversor de tensão, composto por um divisor de tensão formado por dois resistores de 100 [kΩ], reduz a amplitude do sinal do sensor para um nível capaz de ser lido pelo conversor AD do microcontrolador, o qual opera em uma faixa de 0 a 3,3 [V]. Já o segundo conversor amplifica o sinal da saída do microcontrolador para um nível capaz de acionar o atuador, ou seja, converte 3,3 [V] em 5,0 [V] através de um circuito integrado *buffer* 74HC244.

A comunicação entre o microcontrolador e o computador é realizada através de um protocolo serial que opera com uma *baud rate* de 115200 [*bauds*]. A cada 10 [ms] o microcontrolador lê o sinal de referência e o sinal do sensor (utilizando uma resolução de 12 bits) e envia ambos para o computador, que os recebe no ambiente Simulink®. O comando a ser enviado ao atuador é então calculado empregando a lei de controle que será apresentada na Seção 3.

Para tornar a apresentação dos dados mais simples e intuitiva, foi elaborada a interface gráfica apresentada na Figura 4, a qual conta com indicadores (*gauges*) para o sinal de referência convertido para rotações por minuto (RPM), a velocidade medida do motor em RPM, e o valor percentual do sinal de controle aplicado na planta. Adicionalmente, o sinal de referência e a velocidade medida são exibidos em tempo real em uma tela similar à de um osciloscópio, com o eixo das abscissas representando o tempo. Por fim, a interface conta com um botão que permite alternar em tempo real entre os modos de controle em malha aberta e em malha fechada, facilitando a demonstração do efeito da realimentação.

Figura 4 - Interface gráfica desenvolvida no ambiente Simulink®.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3 MODELAGEM DA PLANTA E PROJETO DO CONTROLADOR

3.1 Modelagem do motor acoplado ao gerador sem carga elétrica

Com o gerador desconectado da carga elétrica, a dinâmica do sistema pode ser representada, desprezando os efeitos indutivos na armadura do motor, pelas expressões:

$$J\dot{\omega} = \tau_m - \tau_a \quad (1)$$

$$\tau_m = k_m i_m \quad (2)$$

$$i_m = \frac{v - v_{cem}}{r_m} \quad (3)$$

$$v = k_{pwm} z \quad (4)$$

$$v_{cem} = k_{cem} \omega \quad (5)$$

$$\tau_a = c_1 \omega + c_2 \quad (6)$$

sendo J o momento de inércia do par motor-gerador, ω a velocidade de rotação e τ_a o torque de atrito, com constantes c_1 e c_2 relacionadas às componentes de atrito viscoso e seco (também conhecido como atrito de Coulomb), respectivamente (CHAOUÍ; SICARD, 2012; PLOOIJ; WOLFLAG; WISSE, 2015). No motor, o torque eletromagnético τ_m é relacionado com a corrente de armadura i_m pela constante k_m . Por sua vez, a corrente i_m depende da tensão de armadura v , da resistência de armadura r_m e da tensão induzida v_{cem} , que se relaciona com a velocidade ω por meio da constante k_{cem} (CHAPMAN, 2005, p. 535). Considera-se ainda que a tensão v seja um valor médio relacionado com a porcentagem z de ciclo de trabalho do sinal de PWM por meio de uma constante k_{pwm} .

A partir das expressões (2)-(5) é possível escrever:

$$\tau_m = \frac{k_m k_{pwm}}{r_m} z - \frac{k_m k_{cem}}{r_m} \omega \quad (7)$$

Substituindo (6) e (7) em (1), têm-se:

$$\dot{\omega} = \underbrace{-\frac{1}{J} \left(\frac{k_m k_{cem}}{r_m} + c_1 \right)}_{-a\omega} \omega + \underbrace{\frac{1}{J} \left(\frac{k_m k_{pwm}}{r_m} \right)}_{bz} z - \underbrace{\frac{1}{J} c_2}_{-bz_a} \quad (8)$$

$$\dot{\omega} = -a\omega + b(z - z_a) \quad (9)$$

sendo z_a uma porcentagem de ciclo de trabalho que provocaria um efeito equivalente ao do atrito seco presente no sistema.

Definindo $u = z - z_a$, pode-se reescrever (9) como $\dot{\omega} = -a\omega + bu$, que corresponde à seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{b}{s + a} = \frac{G_{ss}}{\tau s + 1} \quad (10)$$

sendo $G_{ss} = b/a$ o ganho em regime permanente estacionário (*steady state, ss*) e $\tau = 1/a$ a constante de tempo do sistema.

3.2 Identificação dos parâmetros do modelo

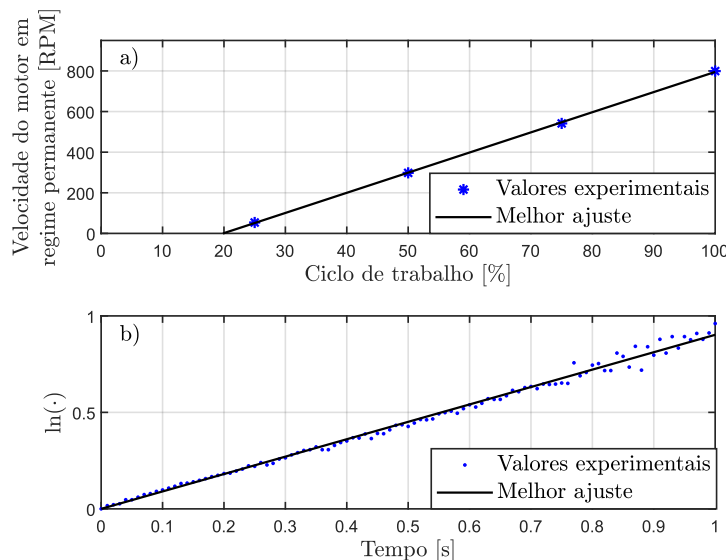
Para a identificação dos parâmetros G_{ss} e τ que compõem o modelo apresentado em (10), foram realizados ensaios de resposta a degrau com auxílio do microcontrolador apresentado na Seção 2.6. Em cada ensaio, foi aplicado um sinal de PWM com porcentagem z_{ss} constante de ciclo de trabalho, empregando valores de 25, 50, 75 e 100 [%]. Os dados foram armazenados durante um intervalo de tempo de 10 [s].

Para cada resposta ao degrau, o valor de regime ω_{ss} , dado pela expressão

$$\omega_{ss} = \frac{b}{a} (z_{ss} - z_a) = G_{ss} (z_{ss} - z_a), \quad (11)$$

foi determinado tomando-se a média da velocidade no trecho final de 9 a 10 segundos. A Figura 5a) mostra os valores de ω_{ss} assim obtidos para cada porcentagem de ciclo de trabalho z_{ss} , bem como uma reta ajustada pelo método dos mínimos quadrados. À luz da equação (11), observa-se que os parâmetros G_{ss} e z_a correspondem ao coeficiente angular da reta e ao ponto em que o eixo de velocidade nula é interceptado. Desse modo, foram obtidos os valores $G_{ss} = 9,92$ [RPM/%] e $z_a = 19,85$ [%].

Figura 5 - Gráfico para obtenção a) dos parâmetros G_{ss} e z_a e b) e da constante de tempo τ .



Fonte: Elaborada pelos autores.

Para determinação da constante de tempo τ , selecionou-se a resposta a degrau $\omega(t)$ referente ao ciclo de trabalho $z_{SS} = 50$ [%]. Tendo em vista a equação (9) com $z - z_a$ constante, tem-se que

$$\omega(t) = \omega_{SS}(1 - e^{-at}) = \omega_{SS}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (12)$$

sendo ω_{SS} o valor de regime já determinado. Para facilitar a obtenção da constante de tempo de forma gráfica, a expressão (12) pode ser reescrita como

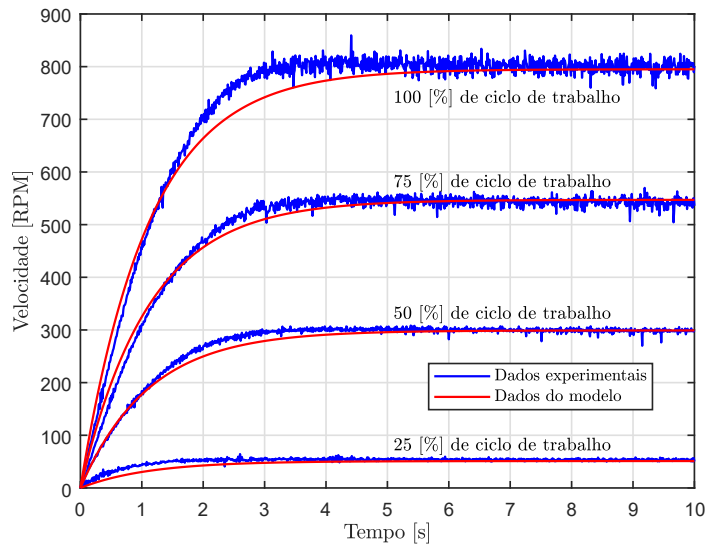
$$\ln\left(\frac{\omega_{SS}}{\omega_{SS} - \omega(t)}\right) = \left(\frac{1}{\tau}\right)t \quad (13)$$

A Figura 5b) apresenta um gráfico da relação (13) para o trecho inicial da resposta, compreendendo o intervalo de tempo de 0 a 1 [s]. O valor de τ foi determinado tomando-se o inverso do coeficiente angular da reta ajustada por mínimos quadrados, tendo-se obtido $\tau = 1,11$ [s]. Em resumo, a função de transferência identificada foi:

$$G(s) = \frac{9,92}{1,11s + 1} \quad (14)$$

Na Figura 6 é apresentada uma comparação entre o resultado das respostas ao degrau obtidas experimentalmente e as respostas calculadas utilizando o modelo apresentado em (14). Nota-se que o modelo de primeira ordem utilizado representa de forma aproximada a dinâmica da planta. Uma melhor aproximação poderia ser obtida com o uso de um modelo de segunda ordem, de modo a levar em conta a indutância de armadura do motor. No entanto, por simplicidade optou-se pelo uso do modelo de primeira ordem.

Figura 6 - Comparação entre as respostas ao degrau experimentais e as obtidas utilizando o modelo $G(s)$.



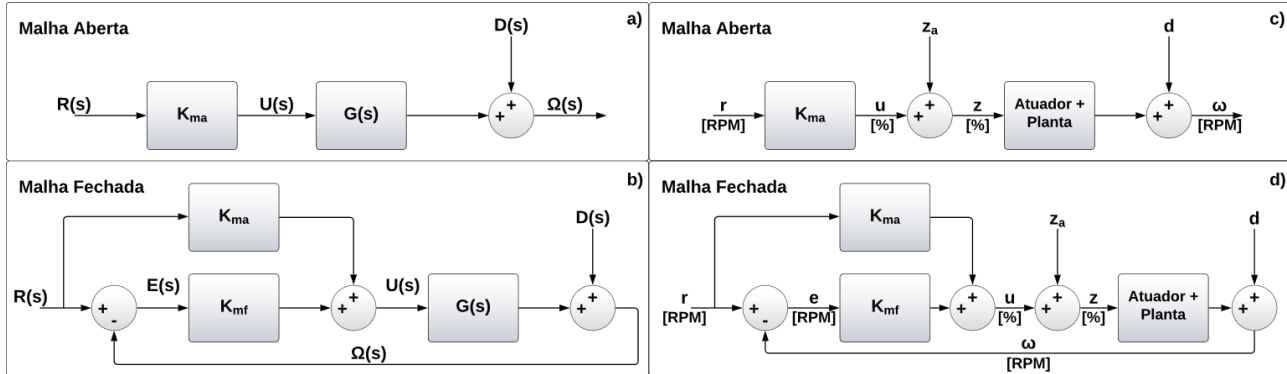
Fonte: Elaborada pelos autores.

3.3 Projeto do controlador

Para ilustrar as diferenças de operação do sistema em malha aberta e malha fechada, foram empregadas as configurações apresentadas nas Figuras 7a) e 7b), respectivamente, com a entrada r denotando a velocidade de referência e variáveis u , z_a , z , ω como definidas na Seção 3.1. O efeito da conexão de carga elétrica ao gerador é representado, de forma simplificada, como um distúrbio de saída d . Empregando a função de transferência $G(s) = \Omega(s)/U(s) = G_{SS}/(\tau s + 1)$, que foi obtida na Seção 3 para $D(s) =$

0, os diagramas de blocos de malha aberta e malha fechada podem ser alternativamente representados na forma das Figuras 7c) e 7d), respectivamente.

Figura 7 - Diagrama de blocos do sistema de controle.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Na ausência de perturbação, a saída em malha aberta é dada por $\Omega(s) = K_{ma}G(s)R(s)$. Para uma referência degrau de amplitude ω_r , o valor de regime ω_{ss} da saída pode ser obtido empregando o Teorema do Valor Final (NISE, 2016, p. 277):

$$\omega_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \Omega(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s K_{ma}G(s)\omega_r/s = K_{ma}G_{ss}\omega_r \quad (15)$$

Portanto, com o intuito de obter um valor de regime ω_{ss} igual ao valor de referência ω_r , o ganho de malha aberta foi ajustado para $K_{ma} = 1/G_{ss} = 0,10$.

Em malha fechada, a função de transferência do sistema é dada por

$$G_{mf}(s) = \frac{\Omega(s)}{R(s)} = \frac{(K_{ma} + K_{mf})G(s)}{1 + K_{mf}G(s)} \quad (16)$$

Recorrendo novamente ao Teorema do Valor Final com referência $R(s) = \omega_r/s$, constata-se que

$$\omega_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s G_{mf}(s)\omega_r/s = \frac{(K_{ma} + K_{mf})G_{ss}}{1 + K_{mf}G_{ss}}\omega_r \quad (17)$$

Portanto, o uso de $K_{ma} = 1/G_{ss}$ continua resultando em um valor de regime ω_{ss} igual à referência ω_r na ausência de perturbação.

Para o projeto do ganho de malha fechada K_{mf} , a função de transferência $G_{mf}(s)$ foi colocada, a partir de (10) e (16), na forma

$$G_{mf}(s) = \frac{(K_{ma} + K_{mf})G_{ss}/\gamma}{(\tau/\gamma)s + 1} \quad (18)$$

sendo $\gamma = 1 + G_{ss}K_{mf}$ um fator de redução na constante de tempo. Assumindo-se como requisito de desempenho tornar a dinâmica duas vezes mais rápida, foi adotado $\gamma = 2$. Como resultado, foi obtido $K_{mf} = 1/G_{ss} = 0,10$. Cabe salientar que este valor é igual ao do ganho de malha aberta $K_{ma} = 1/G_{ss}$, mas trata-se de uma coincidência que ocorre apenas para o valor $\gamma = 2$.

Por fim, os diagramas de blocos apresentados nas Figuras 7c) e 7d) podem ser utilizados a fim de analisar o efeito de uma perturbação com valor d_{ss} em estado estacionário. Para isso, consideremos que a referência seja mantida em um valor constante ω_r e que os ganhos de malha aberta e malha fechada tenham sido ajustados para $K_{ma} = K_{mf} = 1/G_{ss}$, como já discutido.

Em malha aberta, a saída será dada por

$$\Omega(s) = K_{ma}G(s)R(s) + D(s) \quad (19)$$

e, portanto,

$$\omega_{ss} = K_{ma}G_{ss}\omega_r + d_{ss} = \omega_r + d_{ss} \quad (20)$$

Já em malha fechada, a saída será

$$\Omega(s) = \frac{(K_{ma} + K_{mf})G(s)}{1 + K_{mf}G(s)}R(s) + \frac{1}{1 + K_{mf}G(s)}D(s) \quad (21)$$

Desse modo, chega-se a

$$\omega_{ss} = \omega_r + \left(\frac{1}{1 + K_{mf}G_{ss}} \right) d_{ss} = \omega_r + \frac{d_{ss}}{2} \quad (22)$$

Comparando as expressões (20) e (22), observa-se que a perturbação será atenuada por um fator de $(1 + K_{mf}G_{ss})^{-1} = 1/2$ em estado estacionário, ao se empregar o controle em malha fechada.

4 RESULTADOS

A partir do experimento montado, foram realizados dois testes para avaliar a diferença de comportamento em malha aberta e fechada:

- avaliação da dinâmica do sistema por meio da aplicação de um degrau na referência;
- análise do efeito de inserção de uma perturbação.

4.1 Resposta a degrau na referência

A alteração na dinâmica resultante do uso da realimentação foi avaliada por meio de um ensaio de resposta a degrau, empregando uma referência de aproximadamente 300 [RPM]. O resultado pode ser verificado na Figura 8. Para mais fácil visualização, estão anotados os instantes em que a velocidade atingiu o valor de 200 [RPM]. Como se pode observar, essa velocidade foi atingida em 1,32 [s] com o uso de malha aberta e 0,78 [s] em malha fechada. A redução de tempo obtida foi de 1,7 vezes, aproximando-se do requisito de projeto do controlador (que era de dobrar a rapidez de resposta). É importante observar que o controle não chegou a saturar, mantendo-se abaixo do limitante de 100 [%].

Em termos qualitativos, os estudantes podem ter uma clara percepção da maior rapidez de resposta ao usar o dispositivo de comando sem fio. Vale salientar que a interface gráfica desenvolvida no ambiente Simulink® permite fechar e abrir a malha em tempo real, sem a necessidade de reiniciar o experimento.

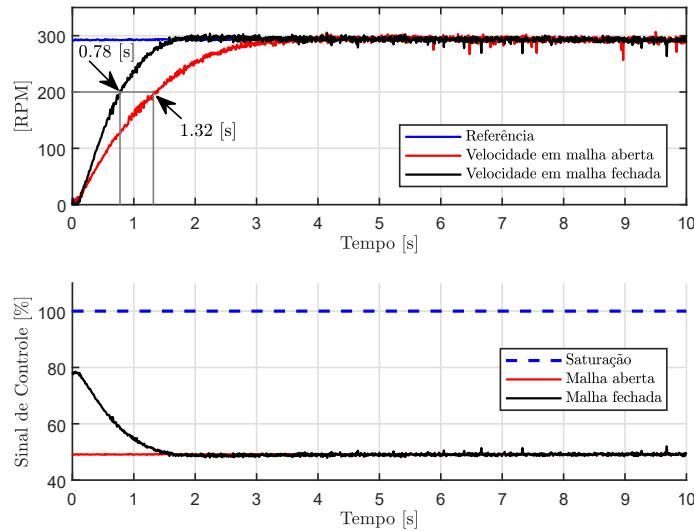
4.2 Inserção de perturbação

Para avaliar o efeito da inserção de uma perturbação na planta, manteve-se a referência constante e conectou-se a carga resistiva ao gerador CC. Os resultados obtidos em malha aberta e malha fechada estão apresentados na Figura 9.

Como esperado, a conexão da carga ao gerador CC resultou em uma redução na velocidade do sistema. Para analisar esse efeito, foram comparadas as velocidades em regime estacionário antes e depois da conexão da carga, tomando-se os valores médios das medições no intervalo de 0 a 5 [s] e no intervalo de 9 a 10 [s], respectivamente. Com isso, foi obtida uma redução de 60 [RPM] em malha aberta e de 31 [RPM] em malha

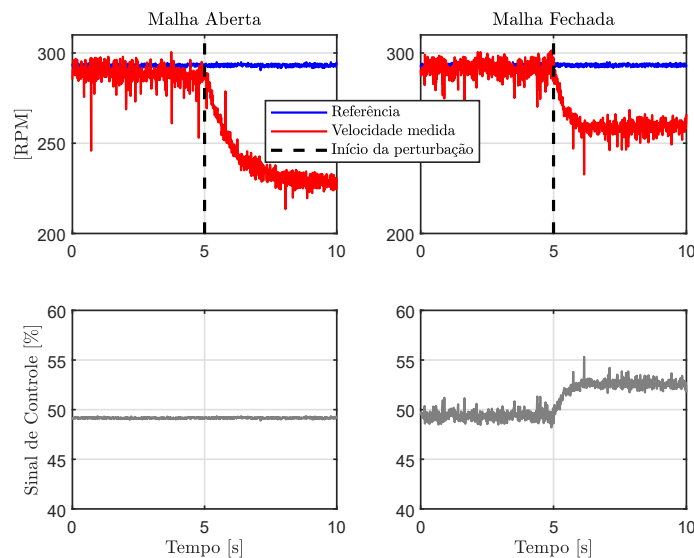
fechada. Como se pode constatar, o uso da realimentação atenuou o efeito da perturbação por um fator de aproximadamente 1/2. Esse resultado está de acordo com as expressões (20) e (22), obtidas ao se modelar a redução de velocidade em malha aberta como um distúrbio de saída de magnitude d_{SS} .

Figura 8 - Respostas a degrau obtidas em malha aberta e fechada.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 9 - Comparação entre malha aberta e malha fechada ao se aplicar uma perturbação.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Vale notar que o erro de regime não foi totalmente eliminado porque a planta é de tipo zero (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013) e a malha tem apenas ação de controle proporcional. Esse aspecto pode ser mencionado como motivação para experimentos posteriores envolvendo ação de controle integral.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, se apresentou um sistema de laboratório concebido para ilustrar conceitos fundamentais de controle em malha fechada e motivar alunos de graduação para o estudo dessa matéria. O uso de um motor CC de porte industrial permite fazer uma analogia com o aparato propulsivo de veículos elétricos, tema que tem crescido em importância recentemente.

O sistema foi efetivamente empregado na primeira prática laboratorial da disciplina EES-01 (Introdução ao Controle de Sistemas) do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), ministrada a alunos do terceiro ano de graduação do curso de Engenharia Eletrônica. Dentro do plano de ensino, a apresentação do sistema completamente montado, incluindo o controlador já sintonizado, teve por objetivo apresentar o que seria o resultado final almejado para as atividades de laboratório da disciplina. Ao longo do experimento, foi possível demonstrar, de forma concreta, as vantagens do uso de um sistema de controle em malha fechada em relação à malha aberta. Ao utilizar a interface sem fio, os alunos puderam comandar alterações na velocidade do motor CC, constatar visual e auditivamente a mudança na rotação do sistema, e observar o resultado na interface gráfica apresentada no computador. Como é possível realizar em tempo real o fechamento e a abertura da malha de controle, foi possível perceber de forma clara a alteração na rapidez da resposta aos comandos dados por meio da interface sem fio. Por fim, foi ilustrado o papel da realimentação na atenuação de perturbações, tendo-se ainda motivado a continuidade do estudo para posterior introdução de controladores com ação integral.

Além do aprendizado dos fundamentos de controle e de modelagem de sistemas, a montagem desse experimento conta também com grande interdisciplinaridade, permitindo o contato com eletrônica digital, eletrônica de potência, programação de microcontroladores, protocolos de comunicação e impressão 3D. Em trabalhos futuros, planeja-se utilizar a interface de comando sem fio em experimentos de simulação que possam também ser realizados em sala de aula.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processo 305233/2022-0.

REFERÊNCIAS

CHAOUJ, H.; SICARD, P. Adaptive fuzzy logic control of permanent magnet synchronous machines with nonlinear friction. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 59, n. 2, 2012.

CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. 4. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2005.

FEISEL, L. D.; ROSA, A. J. **The role of the laboratory in undergraduate engineering education**. Journal of Engineering Education. **Anais...2005**.

FLEMING, J.; MIDGLEY, W. J. B. **Energy-efficient automated driving: effect of a naturalistic eco-ACC on a following vehicle**. Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2023. **Anais...2023**.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Sistemas de controle para engenharia**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda., 2013.

GÜRDÜR BROO, D.; KAYNAK, O.; SAIT, S. M. Rethinking engineering education at the age of industry 5.0. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 25, 2022.

KUH, G. D. The national survey of student engagement: Conceptual and empirical foundations. **New Directions for Institutional Research**, v. 2009, n. 141, 2009.

MRIDUL, T. M. et al. **Designing of an Autonomous System for Electric Vehicle**. International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques. **Anais...**2023.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2016.

NOLEN, S. B.; KORETSKY, M. D. Affordances of Virtual and Physical Laboratory Projects for Instructional Design: Impacts on Student Engagement. **IEEE Transactions on Education**, v. 61, n. 3, 2018.

PLOOIJ, M.; WOLFSLAG, W.; WISSE, M. Robust feedforward control of robotic arms with friction model uncertainty. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 70, 2015.

RASTGOO, S. et al. Using an Intelligent Control Method for Electric Vehicle Charging in Microgrids. **World Electric Vehicle Journal**, v. 13, n. 12, 2022.

SINGH, A. et al. Improving Student Engagement in Teaching Electric Machines through Blended Learning. **IEEE Transactions on Education**, v. 62, n. 4, 2019.

ZHAO, C. **Research on Wireless Charging Smart Car**. 2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering, AUTEEE 2022. **Anais...**2022.

DIDACTIC EXPERIMENT TO PRESENT CONTROL CONCEPTS USING A DC MOTOR AND A WIRELESS COMMAND INTERFACE

Abstract: *This paper presents a laboratory system that can be used to illustrate basic concepts on feedback control of dynamic systems. The task consists of controlling the speed of a DC motor of industrial size coupled to a DC generator. Disturbances can be introduced by connecting the generator to a resistive load, which increases the mechanical load at the motor shaft. The Simulink® environment was employed to implement a proportional control law and to visualize the reference signal, the measured speed and the control in a graphical user interface. The computational setup was configured to receive the reference signal from a wireless command device, resembling a remote control, which can be operated by the students. By using this system, the advantages of closed-loop operation are illustrated in terms of improved disturbance attenuation and faster response to commands.*

Keywords: *Control engineering teaching, proportional control, servomechanism, speed control, DC motor, human-machine interface.*

