

EA722

Laboratório de Princípios de Controle e Servomecanismos

Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação
Prof. Marconi Kolm Madrid

Experimento 1

Fundamentos de Realimentação: Simulação dos Modelos do ECP em Malha Fechada

Equipamento utilizado: Sistema Torcional

Turma D

Participantes:

Nicolas Pereira da silva (RA:247298)

Pedro Nicolás Sampaio Gomes (RA: 247333)

Vinícius Esperança Mantovani (RA: 247395)

Motivação

A motivação deste experimento é compreender e explorar sistemas de controle por meio da simulação dos modelos "Educational Control Products" (ECP). Através desta simulação, busca-se analisar qualitativamente as vantagens da realimentação, tanto no rastreamento de sinais de referência, conhecido como comportamento servo, quanto na atenuação de distúrbios, caracterizado como comportamento regulador. O estudo se concentra em comparar o desempenho de controladores simples, tanto em malha aberta quanto em malha fechada do tipo proporcional, avaliando a influência da realimentação de velocidade, a qual, como veremos à frente, simula matematicamente a alteração da viscosidade do meio, sobre o comportamento do sistema.

Os resultados das simulações atuam como uma ferramenta essencial para guiar os futuros projetos de controle a serem implementados nos sistemas ECP, com o objetivo de testar e validar diversos algoritmos de controle. O estudo também inclui a análise do efeito de um pré-filtro adicional na resposta ao degrau do sistema em malha aberta, buscando otimizar o desempenho desses algoritmos para diferentes aplicações práticas que serão abordadas em experiências subsequentes desta disciplina. Além disso, o estudo também visou o melhor entendimento teórico, por meio de práticas computacionais, a respeito dos sistemas, a fim de conduzir experimentações práticas usando as máquinas do laboratório da disciplina com melhor compreensão dos princípios envolvidos.

Introdução

Neste trabalho, foram conduzidas simulações utilizando as ferramentas MATLAB e Simulink, com o objetivo de analisar as respostas ao degrau de um sistema torcional em configurações de malha aberta e fechada, além de calcular os ganhos de baixa frequência do sistema. Para simplificar a modelagem, optou-se por um modelo reduzido do sistema torcional, ignorando-se entradas como o torque de perturbação, o que permitiu uma análise mais direta dos parâmetros essenciais.

Durante o desenvolvimento, um dos desafios mais significativos foi a criação de um modelo que capturasse com precisão o comportamento dinâmico do sistema, especialmente em relação à realimentação e ao controle proporcional. Para superar essas dificuldades, foram realizados ajustes cuidadosos nos parâmetros do sistema e implementado um controlador proporcional, com o ganho calibrado para minimizar o erro em regime, garantindo assim uma resposta mais eficiente do sistema.

Este relatório descreve detalhadamente os métodos utilizados para derivar as funções de transferência do sistema, a implementação dos modelos em MATLAB e Simulink, e a análise comparativa entre as respostas do sistema em malha aberta e fechada. Além disso, explora-se como a realimentação e o controle proporcional influenciam o comportamento dinâmico do sistema, utilizando os gráficos gerados nas simulações para ilustrar esses efeitos de forma clara e acessível, mesmo para leitores com menos familiaridade com o assunto.

Preliminares para a Simulação do Modelo

1. Função de Transferência $\frac{\theta(s)}{T_a(s)}$

Para resolução deste exercício, considerou-se o sistema da *Figura 1*, zerando-se a entrada de torque de perturbação. Desse modo, pôde-se demonstrar a simplificação da planta para “ T_a ”,

$$G'_{ps} = \frac{\theta(s)}{T_a(s)} = \frac{k_{hw}}{J_1 s^2 + (c_1 + k_{hw} k_v) s + k_1}, J_1 = J_{d1} + J_w; \text{ conforme a Figura 2.}$$

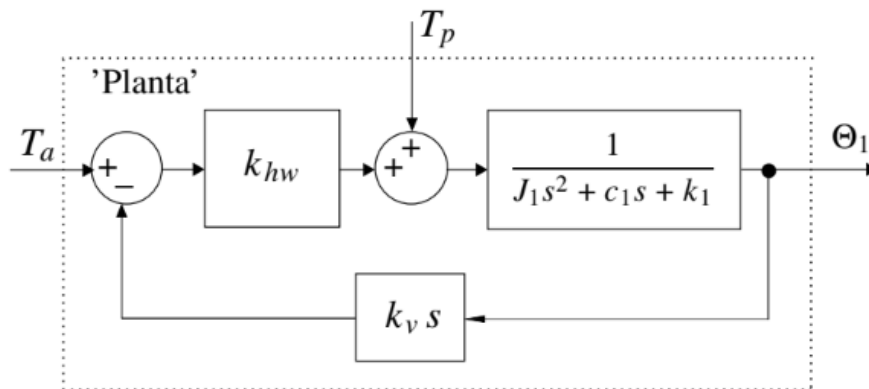


Figura 1: Planta compensada com simulação de atrito viscoso adicional.

Exercício 1: zerando T_p :

$$\Theta_1(s) = (T_a(s) - k_v s \Theta_1(s)) \cdot k_{hw} \cdot \frac{1}{J_1 s^2 + c_1 s + k_1}$$

$$\rightarrow \Theta_1(s) = \frac{T_a(s) k_{hw}}{p} - \frac{k_{hw} k_v s \Theta_1(s)}{p}$$

$$\rightarrow (p + k_{hw} k_v s) \Theta_1(s) = T_a(s) k_{hw}$$

$$\rightarrow \frac{\Theta_1}{T_a(s)} = \frac{k_{hw}}{p + k_{hw} k_v s} = \frac{k_{hw}}{J_1 s^2 + c_1 s + k_1 + k_{hw} k_v s}$$

$$\rightarrow G'_{ps}(s) = \frac{\Theta_1(s)}{T_a(s)} = \frac{k_{hw}}{J_1 s^2 + (c_1 + k_{hw} k_v) s + k_1}, J_1 = J_{d1} + J_{dw}$$

Em J_1 é o momento de inércia total; logo, é a soma das duas que compõem a planta!

Figura 2: Resolução do exercício 1 das “Preliminares para Simulação do Modelo”.

2. Função de Transferência $\frac{\theta(s)}{T_p(s)}$

Neste exercício, de maneira semelhante à conduzida no exercício anterior, foi zerado o valor do Torque de Ativação do sistema, de modo que fosse possível encontrar a simplificação da planta para “ T_p ”, conforme demonstrado na Figura 3, ainda a respeito da planta da Figura 1 e, cujo resultado foi: $G'_{p_r^*} = \frac{\theta(s)}{T_p(s)} = \frac{1}{J_1 s^2 + (c_1 + k_{hw} k_v) s + k_1^*}$, $J_1 = J_{d1} + J_w$; com $k_1^* = \frac{k_1 k_3}{k_1 + k_3}$.

Exercício 2:

zerando $T_a(s)$:

$$\Theta_1(s) = (-k_v s \Theta_1(s) \cdot k_{hw} + T_p(s)) \cdot \frac{1}{\underbrace{J_1 s^2 + c_1 s + k_1^*}_P}$$

$$\rightarrow \Theta_1(s) = \frac{-k_v s \Theta_1(s) \cdot k_{hw} + T_p(s)}{P} \rightarrow \Theta_1(s) = \frac{T_p(s)}{P + k_v k_{hw} s}$$

$$\rightarrow \frac{\Theta_1(s)}{T_p(s)} = \frac{1}{J_1 s^2 + c_1 s + k_1^* + k_v k_{hw} s}$$

$$\rightarrow G'_{p_r^*}(s) = \frac{\Theta(s)}{T_p(s)} = \frac{1}{J_1 s^2 + (c_1 + k_{hw} k_v) s + k_1^*}, \quad J_1 = J_{d1} + J_w$$

↳ onde $k_1^* = \frac{k_1 k_3}{k_1 + k_3}$;

Vale notar que, como k_1^* não depende de $T_p(s)$ nem de $\Theta(s)$, não há diferença no resultado de $G'_{p_r^*}(s)$ se demonstrado com k_1^* ou sua expressão $\frac{k_1 k_3}{k_1 + k_3}$!

Figura 3: Resolução do exercício 2 das “Preliminares para Simulação do Modelo”.

3. Programa Matlab para sistema Torcional

Nesta atividade, foi confeccionado, conforme orientação do roteiro, um programa matlab que imprime todos os dados requisitados e traça, também, os gráficos pedidos (respostas ao degrau em malha aberta e fechada), conforme as Figuras 5 e 6, resultadas do código apresentado a seguir:

% Parâmetros do Sistema Torcional
khw = 17.57; % [Nm/rd]

```

k1 = 2.684; % [Nm/rd]
Jd1 = 2.38e-3; % [Kg m^2]
Jw = 4*(0.5*0.09^2 + 0.5*0.0495^2/8);
k3 = 2.602; % [Nm/rd]
c1 = 7.6e-3; % [Nm/(rd/s)]
kv = 2.5e-2; % [Nm/(rd/s)]
J1 = Jd1 + Jw; % [Kg m^2]
% Função de Transferência para o Servo (G'ps(s))
numerator_Gps = khw;
denominator_Gps = [J1, (c1 + khw * kv), k1];
Gps = tf(numerator_Gps, denominator_Gps);
% Ganho de Baixa Frequência G'ps(0)
Gps_0 = dcgain(Gps);
fprintf('Ganho de Baixa Frequência G'ps(0): %.4f\n', Gps_0);
% Cálculo de k1*
k1_star = 1 / (1/k1 + 1/k3);
% Função de Transferência para o Servo com k1* (G'p*s(s))
denominator_Gps_star = [J1, (c1 + khw * kv), k1_star];
Gps_star = tf(numerator_Gps, denominator_Gps_star);
% Ganho de Baixa Frequência G'p*s(0)
Gps_star_0 = dcgain(Gps_star);
fprintf('Ganho de Baixa Frequência G'p*s(0): %.4f\n', Gps_star_0);
% Função de Transferência para o Regulador (G'pr(s))
numerator_Gpr = 1;
denominator_Gpr = denominator_Gps;
Gpr = tf(numerator_Gpr, denominator_Gpr);
% Ganho de Baixa Frequência G'pr(0)
Gpr_0 = dcgain(Gpr);
fprintf('Ganho de Baixa Frequência G'pr(0): %.4f\n', Gpr_0);
% Comparação dos Ganhos de Baixa Frequência
gain_difference = Gps_0 - Gps_star_0;
fprintf('Diferença entre G'ps(0) e G'p*s(0): %.4f\n', gain_difference);
% Parâmetro do controlador proporcional
Kp = 0.12;
% Função de transferência de malha fechada (Gf(s))
Gf = feedback(Kp * Gps, 1);
% Exibindo a função de transferência de malha fechada
disp('Função de Transferência em Malha Fechada Gf(s):');
Gf
% Ganho de baixa frequência do sistema em malha fechada Gf(0)
Gf_0 = dcgain(Gf);
% Erro de regime para uma entrada degrau unitário
erro_regime_mf = 1 - Gf_0;
% Exibir o erro de regime
fprintf('Erro de regime em malha fechada: %.4f\n', erro_regime_mf);
% Justificativa pelo Teorema do Valor Final
fprintf('Pelo Teorema do Valor Final, o erro de regime é dado por 1 - Gf(0),\n');
fprintf('onde Gf(0) é o ganho de baixa frequência da função de transferência em malha fechada.\n');
% Resposta ao degrau do sistema em malha aberta (Gp(s))
figure;
step(Gps);
title('Resposta ao Degrau em Malha Aberta');

```

```

xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Amplitude');
grid on;
% Resposta ao degrau do sistema em malha fechada (Gf(s))
figure;
step(Gf);
title('Resposta ao Degrau em Malha Fechada');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Amplitude');
grid on;

```

No código acima, é possível notar, que o erro em regime é dado por $1 - Gf(0)$, isso se dá pelo processo exposto a seguir, na *Figura 4*:

$$\begin{aligned}
 \Theta_1(s) &= (\Theta_1(s) - \Theta_2(s)) \cdot G_1(s) \rightarrow \Theta_1(s) = \frac{\Theta_1(s)}{1 + G_1(s)} \\
 \rightarrow \Theta_1(s) &= \frac{1}{s(1 + G_1(s))} \rightarrow E(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s(1 + G_1(s))} \\
 \rightarrow E(s) &= \frac{1 + G_1(s) - 1}{s(1 + G_1(s))} = \\
 \Theta_1(s) &= G_1(s) \cdot \frac{1}{s} \\
 \Theta_1(s) = \frac{1}{s} &\rightarrow \Theta_1(s) = G_1(s) \cdot \frac{1}{s} \\
 \rightarrow E(s) &= \frac{1}{s} - \frac{G_1(s)}{s} \rightarrow e_r = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \left(\frac{1}{s} - \frac{G_1(s)}{s} \right) \\
 \rightarrow e_r &= \lim_{s \rightarrow 0} (1 - G_1(s)) = 1 - \text{DC Gain} \{ G_1(s) \} \\
 &\quad \rightarrow G_1(0)
 \end{aligned}$$

Figura 4: demonstração do erro em regime por meio do Teorema do Valor Final.

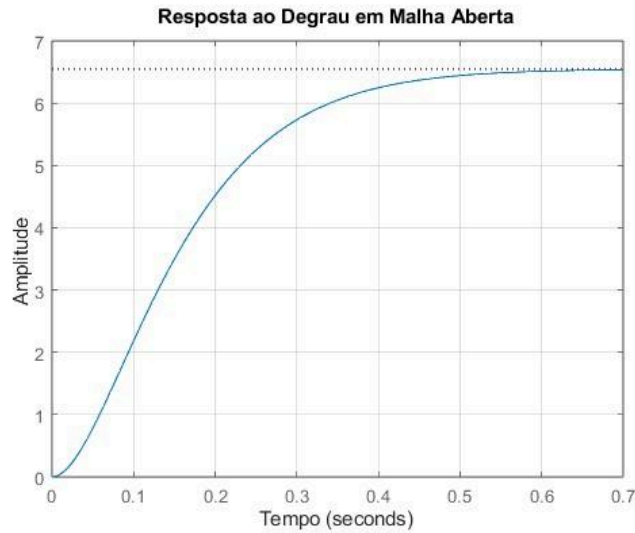


Figura 5: resposta ao degrau em malha aberta (seguindo fig 6_a do roteiro).

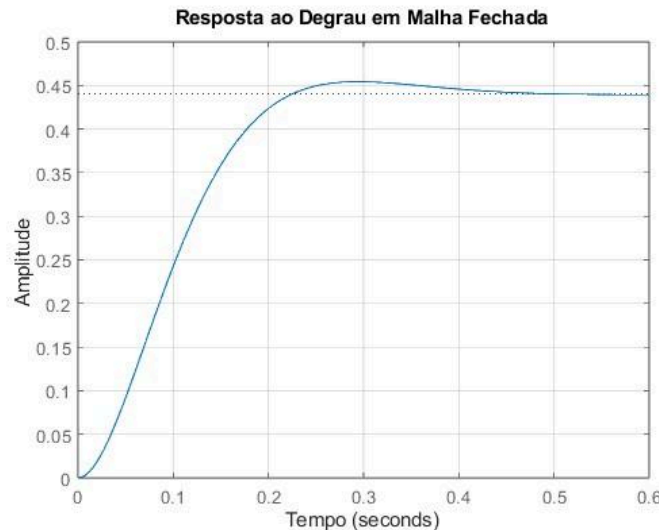


Figura 6: resposta ao degrau em malha fechada (seguindo fig 6_b do roteiro).

Entre as respostas em malha aberta e malha fechada, vê-se uma diferença considerável nas amplitudes máximas e de convergência de cada uma delas e, na forma como suas amplitudes variam. Tais diferenças ocorrem por conta da inexistência de realimentação na malha aberta (por definição) e, pela inexistência de controle proporcional na malha aberta construída. Isso, faz com que a amplitude máxima da resposta ao Degrau em malha aberta seja naturalmente muito maior que a da malha fechada, que é reduzida para um fator de 0,12 (K_p) além da redução natural pela realimentação invertida ($-\theta_1$) ao sinal de entrada (θ_{r1}). Ademais, quanto à diferença nos formatos dos gráficos de resposta ao Degrau para os casos de malha fechada e aberta, pode-se destacar que ocorrem, também, por conta da realimentação, que faz com que a resposta em malha aberta seja proporcional apenas ao valor de entrada, enquanto que na malha fechada, a resposta seja proporcional a um erro entre valor de entrada e valor de saída, provendo uma curva que se “auto-corrigue” e chega ao valor limite mais rápido (embora passe um pouco do valor ao qual converge em regime).

Procedimento de simulação

4. K_{pf} para erro de regime nulo em malha aberta

Neste exercício, foi feito o cálculo do ganho K_{pf} capaz de anular o erro em regime do sistema em malha aberta, considerando que este K_{pf} é o valor de G_{pf}(s), ou seja, é a função de transferência do pré-filtro. Desse modo, pode-se observar tal cálculo abaixo, de maneira que o valor obtido foi:

$$K_{pf} = 0,1528 \text{ Nm/rd}$$

④ $K_{pf} = ? \rightarrow$ Erro de regime mínimo;
"0"

malha aberta :

$\theta_1(s) = G_{pf} \cdot \text{Planta}$ $\theta_{1n}(s) = G_{pf} \cdot G_p(s) \cdot \theta_{1n}(s)$ $\nearrow K_{pf}$

$E(s) = \theta_{1n}(s) - \theta_1(s)$

$\hookrightarrow e_n = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \theta_{1n}(s) (1 - G_p(s) K_{pf})$ $\nearrow U(x) \rightarrow \frac{1}{s}$

$\rightarrow e_n = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{s} \left(1 - \frac{K_{pf} K_{hw}}{4s^2 + (c_1 + K_{hw} K_v)s + K_1} \right) = 1 - \frac{K_{pf} K_{hw}}{K_1}$

$\rightarrow 1 - \frac{K_{pf} K_{hw}}{K_1} = 0 \rightarrow K_{pf} = \frac{K_1}{K_{hw}} = \frac{2,684}{17,57}$

$\rightarrow K_{pf} \cong 0,1528 \text{ Nm/rd}$

Figura 7: cálculo de K_{pf} em malha aberta.

5. Kpf para erro de regime nulo em malha fechada

Nesta atividade, de modo semelhante à anterior, foi calculado o valor de Kpf, mas aqui com valor dependente de Kp, conforme figura abaixo, com valor resultante de:

$$K_{pf} = 1 + \frac{0,1528}{K_p}$$

⑤ $K_{pf} = ? \rightarrow$ Erro em regime nulo;
malha fechada:

$$\Theta_1(s) = [\Theta_{1R}(s) G_{PR}(s) - \Theta_1(s)] K_p \cdot G_{PS}(s)$$
$$\rightarrow \Theta_1(s) = \frac{\Theta_{1R}(s) G_{PR}(s) K_p G_{PS}(s)}{1 + K_p G_{PS}(s)}$$
$$E(s) = \Theta_{1R}(s) \left(1 - \frac{G_{PR}(s) K_p G_{PS}(s)}{1 + K_p G_{PS}(s)} \right)$$
$$\rightarrow e_N = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{s} \left(1 - \frac{K_{pp} K_p G_{PS}(s)}{1 + K_p G_{PS}(s)} \right)$$
$$\rightarrow e_N = \left(1 - \frac{K_{pp} K_p \left(\frac{K_{NW}}{K_I} \right)}{1 + K_p \left(\frac{K_{NW}}{K_I} \right)} \right) = 0 \rightarrow$$
$$\rightarrow K_{pp} = \frac{1 + K_p \left(\frac{K_{NW}}{K_I} \right)}{K_p \left(\frac{K_{NW}}{K_I} \right)} = 1 + \frac{0,1528}{K_p}$$

Figura 7: cálculo de Kpf em malha fechada.

Vale ressaltar que foram adicionadas as seguintes linhas ao código do exercício 3 após os exercícios 4 e 5:

% Definição de Kpf para erro de regime nulo em malha aberta e fechada

Kpf_malha_aberta = 0.1528;

Kpf_malha_fechada = 1+0.1528/Kp;

6, 7, 8, 9. Programas Simulink e gráficos respectivos

Nestas atividades, foram feitos dois modelos Simulink, um para a situação de malha aberta (Figura 8) e um para a de malha fechada (Figura 9):

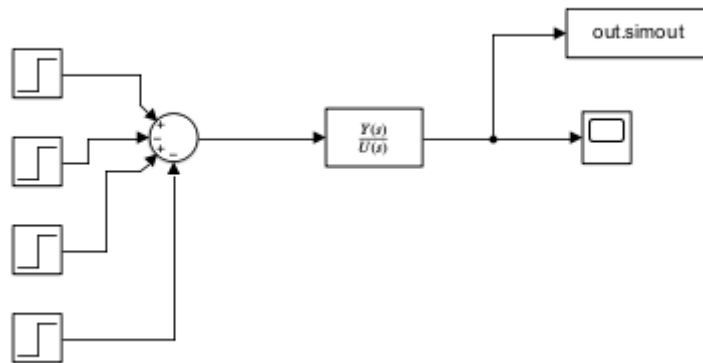


Figura 8: Modelo Simulink malha aberta.

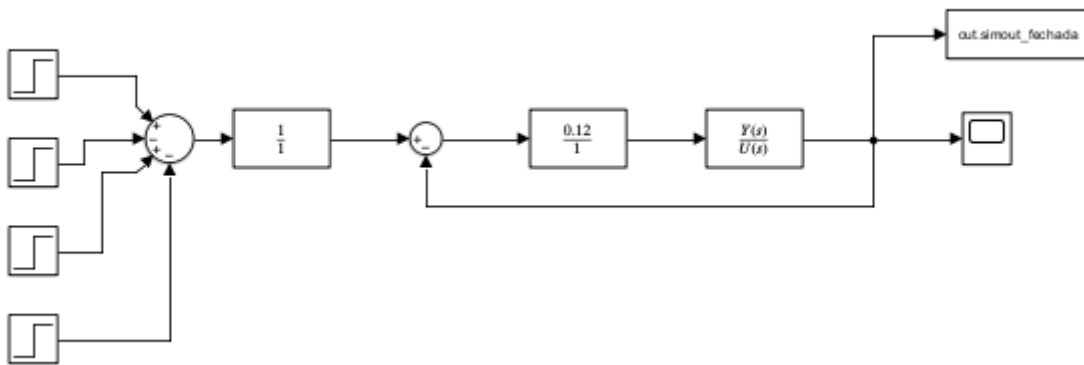


Figura 9: Modelo Simulink malha fechada.

Feitos tais modelos, foi continuado o procedimento com a execução das simulações de ambos e, foram plotados os gráficos de θ (Figuras 10 e 12) e θ_r (Figuras 11 e 13). Por meio destes gráficos, podemos notar diferenças entre a malha fechada e a aberta, de maneira semelhante àquela observada nas respostas ao degrau. Isso porque, no caso que se segue, do mesmo modo que no citado, tem-se uma amplificação grande na malha aberta de θ_r para θ , enquanto que, no caso da malha fechada, há uma redução de θ_r para θ .

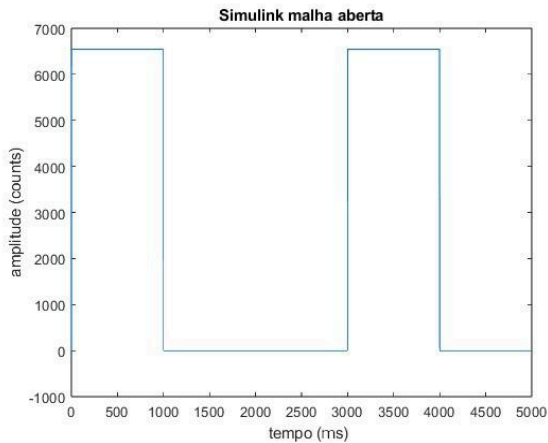


Figura 10: Gráfico θ malha aberta.

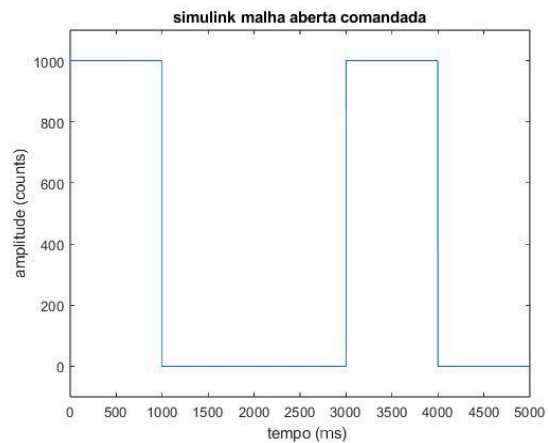


Figura 11: Gráfico θ_r malha aberta.

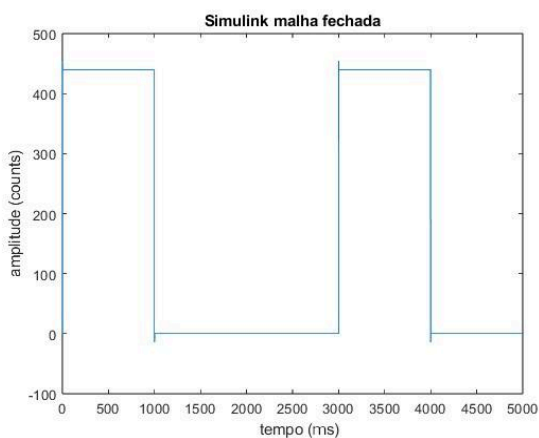


Figura 12: Gráfico θ malha fechada.

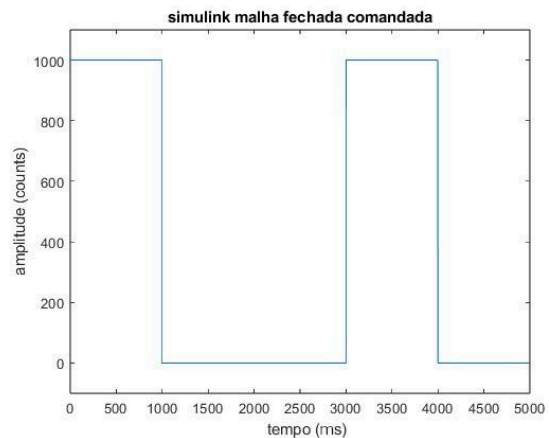


Figura 13: Gráfico θ_r malha fechada.

10, 11 e 12. Reflexões e respostas teóricas sobre o experimento e variações

10. Antes de qualquer tipo de alteração no código, já conseguimos imaginar a seguinte situação: quando $k_{pf} = 1$, temos uma situação, tanto no sistema de malha aberta, quanto no de malha fechada, em que o comportamento do sistema, traduzido em gráfico, vai se parecer com os obtidos no item anterior, sem oscilações conforme o sistema tenta atingir o ponto determinado de amplitude. Conforme o valor de k_{pf} aumenta ou diminui, temos mudanças no valor do ganho por parte do controlador, algo que altera o comportamento do sistema (já que é “regulado” pelo controlador de modo diferente para cada valor de ganho atribuído a ele).

No caso da malha aberta, o k_{pf} calculado teoricamente foi de 0.1528, relativamente pequeno, o que resulta numa incapacidade do sistema de alcançar os valores desejados, que correspondem aos exibidos nos gráficos do item anterior, como mencionado previamente. Desse modo, a posição simulada possui amplitude bem inferior à esperada, uma vez que o sistema em malha aberta ainda não prevê nenhum tipo de realimentação para regular o ganho do controlador. Portanto, a alteração do componente de pré-filtro poderia ser melhor ajustada para compensar erros de regime, embora que o sistema ainda seja sensível a perturbações externas.

Já no caso de malha fechada, temos uma diferença expressiva conforme aproximamos o valor de K_p de 1: lembrando que k_{pf} , no caso da malha fechada, pode ser encontrado a partir do cálculo de $1 + (0.1528/K_p)$, temos que notar que, conforme K_p aumenta, mais próximo de 0 o segundo termo da soma fica, fazendo com que o valor de k_{pf} se aproxime de 1. Desse modo, quando K_p é menor, temos a

amplitude, em malha fechada, muito abaixo do que a esperada, enquanto que, quando este parâmetro é 0.96, o seu valor é o mais próximo da expectativa, em termos aproximados. Entretanto, conforme crescemos K_p , notamos a presença de uma oscilação na saída (oscilação que inicia maior se K_p também for elevado relativamente), decrescente no tempo, devido ao amortecimento simulado na planta, conforme especificado no enunciado do item 8. Isso porque a realimentação do sistema em malha fechada acaba por “intensificar” o efeito do ganho gerado a partir do parâmetro k_{pf} , decorrente do valor de K_p , gerando oscilações devido aos “excessos” que ocorrem sob o sistema em resposta à tentativa de correção do erro na saída. Entretanto, como pudemos observar e entender a partir do item 3, a capacidade de autocorreção do sistema em malha fechada ainda prevalece, com a oscilação sendo amortecida para todos os valores de K_p sugeridos (embora que, para valores maiores, a oscilação tarda mais a diminuir de modo considerável).

11. Ao retirarmos o disco 2 do sistema simulado, já podemos esperar mudanças notáveis em relação ao comportamento do sistema, uma vez que a componente elástica/torcional do sistema será alterada de maneira considerável.

Quanto ao sistema em malha aberta, o distúrbio causado por essa remoção, na saída, será observado na forma de um notável aumento na amplitude do sinal de saída do sistema em relação ao resultado padrão esperado, uma vez que o sistema, com um disco a menos, apresenta menor massa inercial (com uma consequente menor constante de elasticidade) para “frear” o crescimento da amplitude da saída. Se estivéssemos pensando no sistema “real”, simulado neste experimento, poderíamos esperar que uma rotação mais vigorosa do eixo do sistema torcional ocorresse. Além disso, sem um sistema de realimentação para realizar o controle da planta, o sistema continuaria sendo incapaz de recuperar sua posição autonomamente de modo eficiente.

Já para o sistema em malha fechada, o controle proporcional mais uma vez reage ao erro resultante observado na saída do sistema para todos os 4 valores adotados para K_p , sendo que, seguindo a mesma lógica explanada anteriormente no item 10, os valores mais elevados para K_p geram menor erro da saída em termos de amplitude, mas também acabam gerando maior instabilidade quando ocorrem transições em termos das amplitudes esperadas na saída (como nos degraus observados). Portanto, as mesmas conclusões que foram ditas no item 10 também acabam valendo para este item, com a diferença que existe menor oscilação, em geral, observadas na saída do sistema, uma vez que temos menor influência da constante de mola do sistema simulado, e agora o erro de amplitude é mais presente devido ao fato de que a saída do sistema apresenta amplitude superior à esperada.

12.a) O comportamento regulador, que aparece melhor nos momentos em que utilizamos o sistema em malha fechada, tem um desempenho melhor em relação ao controle dos distúrbios que ocorrem sobre o sistema, partindo da ação do controlador principal regulado a partir dos parâmetros de ganho especificados para minimizar a diferença entre a posição desejada e a que realmente acontece. No sistema de malha fechada, quando ocorre algum tipo de influência externa sobre o sistema, a realimentação desse tipo de sistema tenta compensar o erro, atenuando seu efeito na saída, ao mesmo tempo em que o sistema ajusta sua resposta para retornar à trajetória desejada.

Já em um sistema de malha aberta, o sistema, sem realimentação para a realização de controle. Desse modo, quando há uma perturbação sobre o sistema, o mesmo não é capaz de realizar qualquer tipo de compensação ou atenuação automaticamente em resposta a essa influência externa. Como resultado, temos um erro de posição mais elevado e persistente, enquanto também permanece o presente o referido distúrbio.

b) Como foi observado ao longo das observações feitas nos itens 10 e 11, podemos relacionar o valor atribuído ao parâmetro K_p com a intensidade da reação do controlador ao erro de posição entre o valor de referência e a posição real obtida na saída do sistema simulado.

Quando o valor do parâmetro era baixo, observamos uma reação mais lenta a mudanças e distúrbios externos, com correção de erro mais suave e ineficaz, com erro de regime sendo ainda grande quando comparado com os resultados obtidos para valores superiores de K_p . Para os valores elevados de K_p , o efeito era o contrário, com a compensação do distúrbio externo acontecendo com maior eficiência, resultando em resposta mais precisa, com menor erro resultante. No entanto, para o K_p elevado, também é possível observar certa instabilidade, provocando oscilações mais bruscas na saída, uma vez que o sistema reage de modo mais “agressivo” em relação aos estímulos externos ao sistemas. No nosso caso, não observou-se instabilidade contínua, com o caráter oscilatório decrescente ajudando a reduzir o erro da saída, uma vez que a componente de amortecimento introduzida no sistema era não nula.

c) Acompanhando a resposta dada nos subitens anteriores, o regime em malha aberta apresenta maior erro de regime em relação ao sistema em malha fechada, uma vez que a falta de um mecanismo de correção ativa decorrente da não existência da realimentação, essencial para um sistema de controle desse tipo, acaba por fazer com que o erro da saída do sistema não seja corrigida de modo autônomo por parte do sistema, especialmente em sistemas com modelos parecidos com o utilizado (torcional). Já quando se trabalha em malha fechada, o erro de regime tende a ser menor, dependendo, como já foi falado, do valor escolhido para o ganho K_p , com o erro de regime sendo proporcional ao ganho K_p .

Conclusão

Ao realizar os experimentos propostos e analisar teoricamente os resultados obtidos, foi possível compreender como os parâmetros e condições do sistema afetam o comportamento de um sistema físico torcional, em âmbito teórico. A partir das simulações feitas, foi possível também ter uma ideia de como serão os resultados obtidos a partir dos mesmos experimentos feitos a partir das máquinas físicas do laboratório da disciplina.

A partir das análises feitas, foi possível entender a importância de configurar dados para os parâmetros de ganho de sistemas onde a operação de controle é fundamental para minimizar erros de operação de diferentes processos, além de verificar as diferenças entre sistemas em malha aberta e fechada.