

Instruções

- A prova é **estritamente individual**. Qualquer violação a esta premissa implicará na anulação da prova (nota zero);
- É **permitida a consulta** ao material didático (livros, anotações, slides e notas de aula, internet apenas para buscar documentação de software se necessário) e utilização do computador para realizar todas as questões;
- A entrega da prova deve conter:
 - Um arquivo com
 - * os desenvolvimentos feitos à mão (fotos ou scan),
 - * os resultados das simulações com as devidas análises,**seguindo a ordem dos enunciados;**
 - Código computacional utilizado para gerar os resultados do arquivo PDF, com instruções de como rodá-lo;
- As entregas serão feitas **através do EAD até o prazo ali estipulado**:
 - Entrega parcial: questões 1 e 2a,b,c,d **3 h após a entrega da prova**;
 - Entrega final: questões 2e e demais **até domingo 17/5 às 20h**;

O aluno pode corrigir, na entrega final, os itens da entrega parcial com as devidas justificativas;
- Sugiro que usem os live scripts do MATLAB (mlx) ou jupyter notebooks (python) pois já podem escrever códigos e análises em um lugar só e otimizar o uso do tempo.

Boa prova!

1. (2 points) Para o sistema em malha fechada composto por

$$G(s) = \frac{0.1}{s(s+0.05)}, H(s) = \frac{1}{0.1s+1} \quad (1)$$

disposto como na Fig. 1, projete um compensador $G_c(s)$ que atenda aos requisitos de $t_{s2\%} = 6$ segundos, $\zeta = 0.8$.

Compare através de simulações a resposta do sistema em malha fechada projetado com o sistema de segunda ordem equivalente aos requisitos. Justifique suas escolhas de projeto, analise a resposta, e explique caso esta seja diferente do especificado pelo par de pólos conjugados do sistema de segunda ordem.

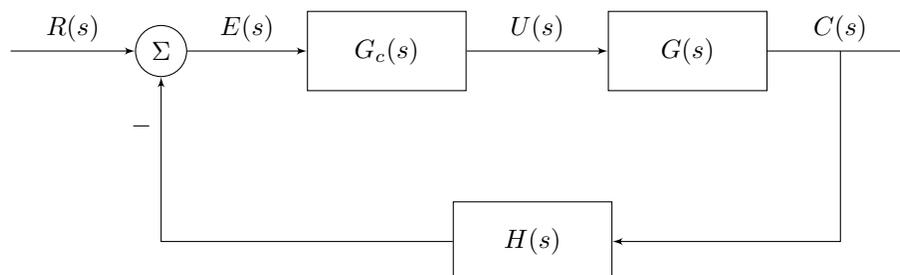


Figura 1: Arquitetura do sistema em malha fechada analisado na Questão 1.

2. (6 points) Para esta questão considere o *Single-Link Flexible Joint Robot*, sistema eletromecânico representado na Fig. 2. Este é frequentemente utilizado como estudo de caso para detecção de falhas e controle de manipuladores flexíveis.

Nesta figura q_l e q_m são as posições angulares do elo e do motor, respectivamente. Temos $q_l = 0$ quando o elo J_l encontra-se na vertical. Os momentos de inércia do elo e do motor são descritos respectivamente por $J_l = 9.3 \times 10^{-3}$ e $J_m = 3.7 \times 10^{-3}$. A mola torsional, utilizada para representar o comportamento flexível do eixo do motor, tem sua constante $k = 1.8 \times 10^{-1}$. A massa e comprimento do elo são denotados por $m = 2.1 \times 10^{-1}$ e $h = 1.5 \times 10^{-1}$, respectivamente. O coeficiente do amortecedor é dado por $b = 4.6 \times 10^{-2}$, que representa perdas devido à rotação do motor. Considere a gravidade $g = 9.81$. Os parâmetros do motor são $R = 5 \times 10^{-1}$, $L = 1 \times 10^{-2}$, $k_m = 4.33 \times 10^{-2}$ para a resistência, indutância, e constante contrafem/torque (considere a constante de torque igual à constante contrafem). Finalmente, as entradas exógenas do sistema são dadas pela tensão aplicada no circuito de acionamento do motor $e_i(t)$ e pelo distúrbio $\tau_l(t)$. Todos os parâmetros são dados no SI.

Os parâmetros do sistema encontram-se abaixo para sua conveniência (copy-paste):

```
Jl = 9.3e-3; Jm = 3.7e-3; k=1.8e-1; m = 2.1e-1; h = 1.5e-1;
b = 4.6e-2; g = 9.81; R = 0.5; L = 1e-2; km = 4.33e-2;
```

O objetivo é comparar soluções diferentes de compensadores, através da simulação e análise da resposta do sistema a (i) seguimento de referências e (ii) rejeição a distúrbios.

Para tanto, obtenha:

- (a) A equação diferencial que descreve a dinâmica do circuito de acionamento do motor, aplicando a Lei de Kirchhoff das tensões. O torque eletromagnético e a tensão de contrafem são descritos respectivamente por

$$\tau_m = k_m \dot{i}, \quad (2)$$

$$e_b = k_m \omega_m; \quad (3)$$

- (b) O diagrama de corpo livre de cada massa e momento de inércia, indicando as forças e torques e suas definições;
- (c) O conjunto de equações de movimento do subsistema mecânico;
- (d) Um modelo no espaço de estados não linear

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, u, w), \quad (4)$$

onde u é a tensão e_i e w é o distúrbio τ_l ;

- (e) A linearização do sistema em um ponto de equilíbrio da sua escolha;
- (f) Obtenha a função de transferência do sistema linearizado, considerando como saída a posição angular θ_l ;
- (g) A simulação do sistema linear e não linear em malha aberta. Analise as variáveis de estado e compare o sistema não linear com o sistema linearizado;
- (h) A localização dos pólos em malha aberta;
- (i) Plote o lugar das raízes para o controlador P (proporcional), ou seja,

$$G_c(s) = K_P, \quad (5)$$

de acordo com a malha na Fig. 3 e analise o que se pode melhorar na resposta do sistema ajustando apenas um ganho;

(j) Projete controladores I (integral) e PI (proporcional integral), respectivamente,

$$G_c(s) = \frac{K_i}{s}, \quad (6)$$

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_i}{s}, \quad (7)$$

de modo a melhorar a resposta a entradas $r(t)$ do tipo degrau. Use o lugar das raízes para analisar e justificar as escolhas de projeto;

(k) Valide o projeto dos controladores P, I e PI utilizando o sistema linearizado (modelo do item (f)) e o sistema não linear (modelo do item (e)) através de simulações numéricas. Avalie a capacidade do sistema em malha fechada de

- Seguimento de trajetória;
- Rejeição a distúrbios do tipo degrau.

Justifique ambos resultados de simulação através da análise do erro em regime permanente do sistema linearizado.

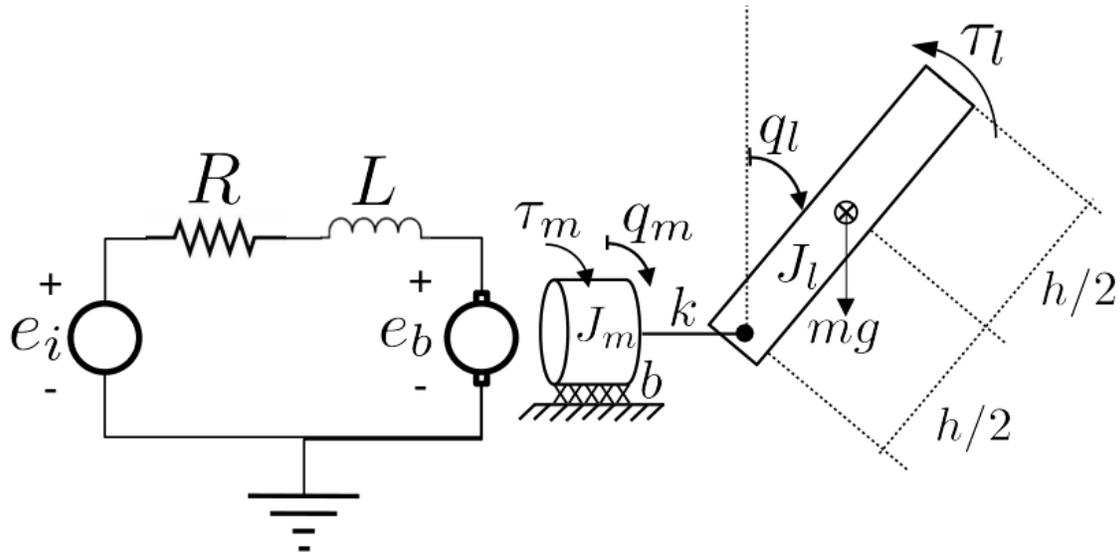


Figura 2: *Single-Link Flexible Joint Robot*. O objetivo com o projeto do sistema em malha fechada é controlar a posição do sistema sujeito a distúrbios de carga no manipulador representados pelo torque τ_l , através da medição do ângulo $q_l(t)$ e ação de controle da tensão do motor elétrico descrita por $e_i(t)$.

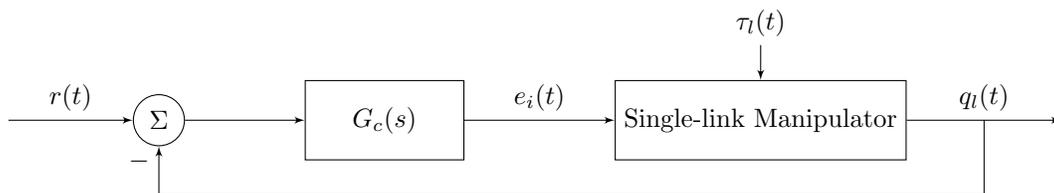


Figura 3: Sistema eletromecânico utilizado na Questão 2. Neste gráfico, $G_c(s)$ representa o compensador a ser projetado de modo que a referência $r(t)$ desejada para $q_l(t)$ seja seguida, mesmo na presença de distúrbios do tipo degrau. As variáveis exógenas do sistema são $e_i(t)$, $\tau_l(t)$, que representam respectivamente a tensão no motor elétrico e o torque de carga no manipulador.