

ES710 - Controle de Sistemas Mecânicos

Projeto de Aplicação Prática - Controle de um Sistema Ponte Rolante

Profa Grace S. Deaecto, Lucas De Cunto Costanzo

- Cada projeto deve ser desenvolvido em dupla.
- **É proibido consultar os colegas de grupos diferentes**, mas é permitida a consulta a qualquer referência bibliográfica desde que mencionada a fonte.

Um equipamento muito presente na indústria é a ponte rolante. Ela é utilizada para deslocamento de cargas grandes e pesadas que não podem ser movidas facilmente de forma manual. Composta por trilho, carro e talha, pode ser modelada como um sistema carro-pêndulo apresentado na Figura 1.

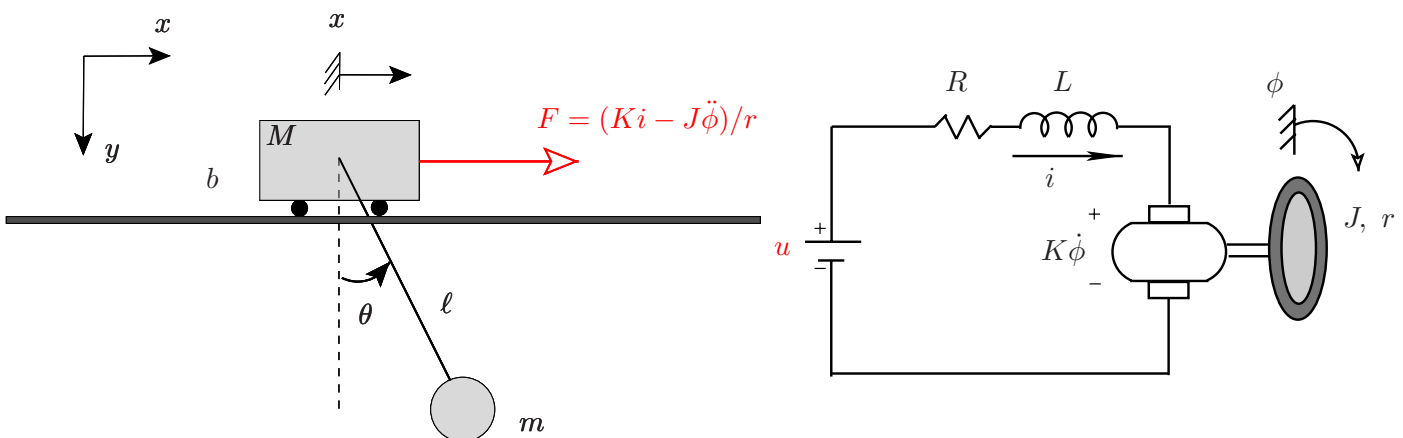


Figura 1: Carro-pêndulo

Este sistema consiste de um pêndulo, composto por uma haste de massa desprezível de comprimento ℓ e uma esfera de massa m , acoplado a um carro de massa M . Como pode ser observado na Figura 1, a medida que o carro desloca-se em x sobre a ação de uma força horizontal F , o pêndulo realiza um deslocamento angular θ . Considere que o atrito viscoso entre o ar e o carro é denotado por b . Nosso objetivo é realizar o projeto de um controlador $C(s)$ de forma a levar o carro para uma posição de referência $x_{ref}(t) = 10$ [m]. A ideia é sintetizar a força $F(t)$ que é transferida ao carro a partir da aplicação de uma tensão $u(t)$ no motor, processando-se o erro entre $x_{ref}(t)$ e $x(t)$. Considere que não existe escorregamento entre o motor e o trilho, ou seja, $x(t) = r\phi(t)$ e que a indutância do motor é desprezível $L \approx 0$.

1. Determine o modelo matemático não linear em função de $x(t)$, $\theta(t)$ e da entrada $u(t)$ utilizando o referencial proposto na Figura 1.

- Determine a representação em espaço de estado do modelo não linear considerando que a saída é $y(t) = x(t)$ e que o vetor de estado é $\xi = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]'$.
- Determine todos os pontos de equilíbrio do sistema e forneça o modelo matemático linearizado em torno da origem.
- Escreva o modelo matemático linearizado na representação em espaço de estado

$$\dot{\xi}(t) = A\xi(t) + Bu(t), \quad \xi(0) = 0 \quad (1)$$

$$y(t) = C\xi(t) + Du(t) \quad (2)$$

considerando $\xi = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]'$ e $y(t) = x(t)$.

- Considere os dados numéricos apresentados na Tabela 1. Utilizando a estrutura de controle em malha fechada da Figura 2 a seguir

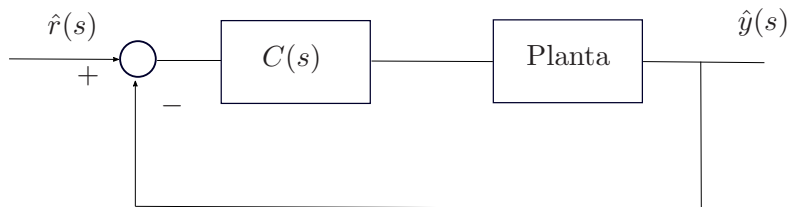


Figura 2: Estrutura de controle em malha fechada

projete um controlador $C(s)$ para o sistema linearizado de forma a satisfazer os seguintes requisitos de desempenho:

- Erro nulo para entrada degrau;
- Tempo de estabilização menor do que 4,5 segundos;
- Fator de amortecimento $\xi \geq \sqrt{2}/2$;
- Esforço de controle $|u| \leq 25$ [V].

Apresente a resposta no tempo de $y(t)$ e do esforço de controle $u(t)$ correspondente.

Parâmetro	Valor	Unidade
$M + J/(r^2)$	1,0731	[kg]
m	0,209	[kg]
ℓ	0,3302	[m]
$b + K^2/(r^2 R)$	5,4	[N.s/(m ²)]
$K/(rR)$	1,0717	[N/V]

Tabela 1: Valores dos parâmetros do sistema em unidades SI.

6. Plote o diagrama polar de $C(j\omega)G(j\omega)$ e, a partir dele, obtenha as margens de ganho e de fase. Verifique se os valores determinados estão coerentes com aqueles obtidos a partir do diagrama de Bode.
7. Analise o desempenho do controlador projetado no que se refere às margens de ganho e de fase.
8. Aplique o controlador $C(s)$ no sistema não linear obtido no item 2 e compare as respostas com as obtidas pelo modelo linearizado. Para ambos os casos (linear e não linear), apresente x , \dot{x} , θ e $\dot{\theta}$.
9. Utilizando o controlador projetado, apresente o controlador digital equivalente para todos os seguintes métodos: Segurador de Ordem Zero $C_S(z)$, Tustin $C_T(z)$ e Mapeamento de Polos e Zeros $C_M(z)$.
10. Conecte cada um dos controladores digitais no sistema linearizado e analise o desempenho para os seguintes períodos de amostragem $T = \{0,1; 0,5; 1,0\}$.
11. Conecte o controlador digital que apresentou o melhor desempenho no sistema não-linear e analise a resposta para $T = \{0,1; 1,0\}$. Compare com a resposta obtida no item anterior.
12. Para $T = 1$ realize o projeto direto do controlador digital de forma a fornecer um desempenho melhor do que o controlador digital projetado no item anterior. Conecte este controlador no sistema não-linear e compare com a resposta obtida pelo modelo linear.
13. Para os dois últimos itens forneça os sinais x , \dot{x} , θ e $\dot{\theta}$.

Entrega: A entrega deverá ser feita pelo Moodle em portfólio de grupo nomeado pelos nomes dos participantes em ordem alfabética (ex: Luana_Rafael) até o dia 08/12 às 23h59. O arquivo a ser entregue deve ser um .zip contendo o *script* `main.m` com os programas utilizados bem como os códigos no Simulink. Além disso apresente um relatório descrevendo os passos realizados durante o projeto contendo também o lugar das raízes da equação característica do sistema em malha fechada. O relatório deve conter todas as informações relevantes, incluindo funções de transferência e respostas temporais.