

# Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA

## Controle para Sistemas Computacionais – CMC-12

### Lista 3 – Controlador Proporcional e Realimentação de Velocidade

**Professor:** Marcos Ricardo Omena de Albuquerque Maximo

16 de março de 2022

**Observação:** A entrega da solução dessa lista consiste de submissão de arquivos no Google Classroom. Compacte todos os arquivos a serem submetidos em um único **.zip** (use obrigatoriamente **.zip**, e **não** outra tecnologia de compactação de arquivos) e anexe esse **.zip** no Google Classroom. O arquivo com os passos das soluções de todas as questões (rascunho) deve ser entregue num arquivo chamado **rascunho.pdf** (**não** usar outro formato além de **.pdf**). Para o **.zip**, use o padrão de nome **<login\_ga>\_listaX.zip**. Por exemplo, se seu login é **marcos.maximo** e você está entregando a lista 1, o nome do arquivo deve ser **marcos.maximo\_lista1.zip**. **Não** crie subpastas, deixe todos os arquivos na “raiz” do **.zip**. Remova todas as impressões do seu código antes de submeter (e.g. lembre de terminar cada linha com ‘;’). Use SI para as suas respostas.

**Questão 1.** Considere um motor elétrico como o apresentado na Figura 1, em que a dinâmica de corrente é rápida o suficiente para ser ignorada, i.e. pode-se considerar  $L \approx 0$ . Deseja-se projetar um servomotor de velocidade para esse motor, i.e. deseja-se controlar a velocidade angular  $\omega$  do motor. Para isso, a lei de controle escolhida foi “*feedforward* + P”, dada por

$$V(t) = u_{ff}(t) + u_{fb}(t) = K_{ff}\omega_r + K_p e(t), \quad (1)$$

em que  $u_{ff}(t)$  e  $u_{fb}(t)$  são os termos de *feedforward* e *feedback* do controlador, respectivamente,  $V(t)$  é a tensão aplicada nos terminais do motor,  $K_{ff}$  é o ganho do *feedforward*,  $K_p$  é o ganho proporcional,  $\omega_r$  é a velocidade angular de referência e  $e(t) = \omega_r - \omega(t)$  é o erro de velocidade angular. Com isso, pede-se:

- (a) Deseja-se que o sistema não tenha erro em regime para  $\omega_r$  constante. Determine  $K_{ff}$  para que este requisito seja atendido.
- (b) Deseja-se que o sistema tenha uma constante de tempo  $\tau$ . Determine  $K_p$  para que este requisito seja atendido.

Dê suas respostas através dos arquivos de MATLAB **questao1a.m** e **questao1b.m**. Use parâmetros conhecidos de modelagem de motor elétrico:  $J$  é a inércia,  $b$  é a constante de amortecimento,  $R$  é a resistência,  $L$  é a indutância,  $K_t$  é a constante de torque.

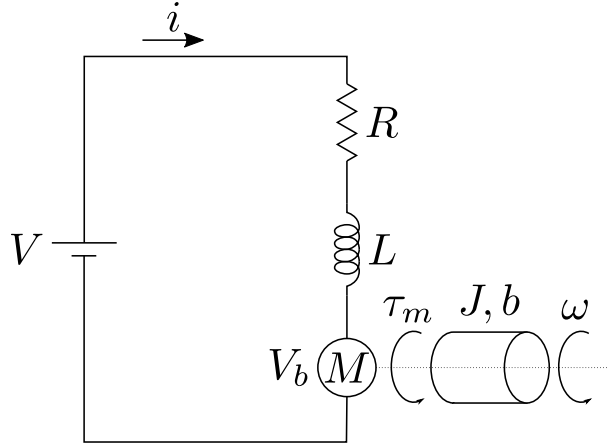


Figura 1: Motor elétrico.

**Questão 2.** Considere um motor elétrico como o apresentado na Figura 1, em que a dinâmica de corrente é rápida o suficiente para ser ignorada, i.e. pode-se considerar  $L \approx 0$ . Deseja-se projetar um servomotor de posição para esse motor, i.e. deseja-se controlar a posição angular  $\theta$  do motor. Para isso, adota-se um sistema de malhas fechadas aninhadas com as seguintes leis (controlador P+V):

$$\begin{cases} \omega_r(t) = K_p (\theta_r - \theta(t)), \\ V(t) = K_v (\omega_r(t) - \omega(t)), \end{cases} \quad (2)$$

em que  $K_p$  é o ganho proporcional (da malha de posição),  $K_v$  é o ganho da malha de velocidade,  $\theta_r$  é a posição de referência,  $\omega_r(t)$  é a velocidade angular comandada pela malha externa de posição e  $\omega(t)$  é a velocidade angular do motor. Um diagrama de blocos deste sistema de controle é mostrado na Figura 2, em que “Motor Elétrico” refere-se à planta, cujo diagrama é mostrado na Figura 3. Considerando um sistema de 2ª ordem padrão dado por

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y = \omega_n^2 u, \quad (3)$$

em que  $\omega_n$  é a frequência natural e  $\xi$  é o fator de amortecimento. Determine  $K_p$  e  $K_v$  para que o servomotor de posição se comporte como um sistema de 2ª ordem com frequência natural  $\omega_n$  e fator de amortecimento  $\xi$  desejados. Forneça sua resposta através do arquivo de MATLAB `questao2.m`.

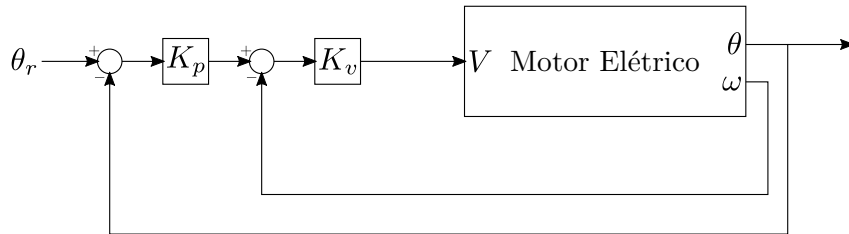


Figura 2: Motor elétrico.

**Questão 3.** No futebol de robôs, uma estratégia de controle comum para que o robô realize gols é fazer este seguir uma linha passando pela bola. Para isso, usa-se como

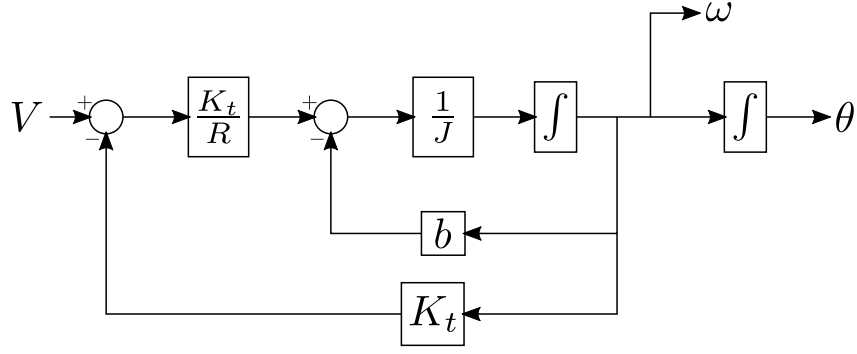


Figura 3: Motor elétrico.

realimentação a posição e a orientação do robô determinadas através de uma câmera acima do campo e algoritmos de visão computacional. Conforme mostrado em sala, pode-se modelar um robô seguidor de linha (ver Figura 4) por

$$\begin{cases} \dot{h}(t) = v \sin \psi(t), \\ \dot{\psi}(t) = \omega(t), \end{cases} \quad (4)$$

em que  $h$  é a distância do robô até a linha,  $\psi$  é o ângulo do robô em relação à linha e  $v$  é a velocidade linear do robô (constante). Para que o sistema torne-se linear, assume-se  $\sin \psi \approx \psi$ . Considerando uma estratégia de controle com malhas aninhadas (distância e ângulo) de acordo com

$$\begin{cases} \psi_r(t) = K_p (h_r - h(t)), \\ \omega(t) = K_\psi (\psi_r(t) - \psi(t)), \end{cases} \quad (5)$$

em que  $K_p$  é um ganho proporcional,  $K_\psi$  é um ganho de velocidade (usado para controlar o ângulo  $\psi$ ),  $h_r$  é a distância de referência (em relação à linha) e  $\psi_r(t)$  é o ângulo comandado pela malha externa de distância. Pede-se para escrever a dinâmica do sistema em malha fechada no formato de espaço de estados. Considere que a saída é  $y = h$ . Dê sua resposta através do arquivo de MATLAB `questao3.m`.

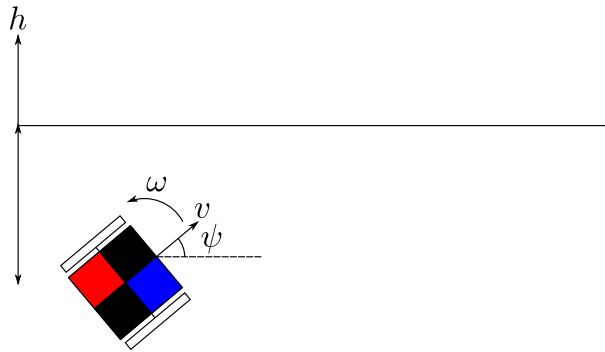


Figura 4: Robô seguidor de linha.