

## Projeto Final – Servo-acionamento de motor DC

*Prof. Eric Fujiwara – DSI – FEM*

### ORIENTAÇÕES GERAIS

- O projeto deve ser redigido no mesmo formato do relatório, com exceção do número de páginas, estendido para 20 no caso do projeto;
- O **documento impresso deve ser entregue na data indicada**, conforme a ementa do curso. Relatórios entregues fora do prazo receberão **nota zero** automaticamente;
- Nesse mesmo dia, os alunos deverão **explicar e demonstrar o funcionamento do programa** de simulação, respondendo também aos questionamentos por parte dos professores;
- Se a simulação for implementada em uma versão mais recente do MATLAB, recomenda-se que o aluno faça a apresentação a partir de seu computador pessoal;
- A **nota do projeto será baseada no relatório redigido e na apresentação** em sala de aula;
- Cópias parciais ou *ipsis litteris* de trabalhos receberão **nota zero** automaticamente;
- O **exercício complementar é opcional**, mas vale um bônus na **média final**.

## **Projeto Final – Servo-acionamento de motor DC**

### **1. OBJETIVOS**

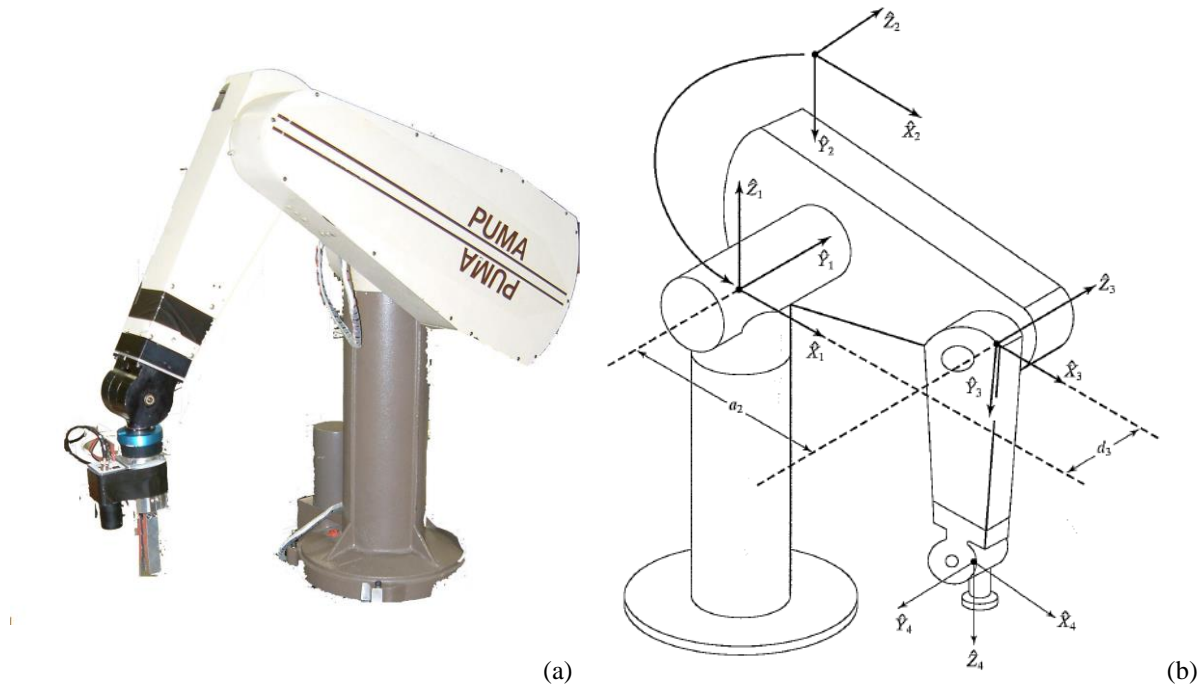
- Implementar o acionamento de um motor DC através de um conversor de potência;
- Realizar o controle da posição do motor a partir de um servo-acionamento;
- Integrar os sistemas mecânico e elétrico por meio da malha de controle, concretizando o sistema mecatrônico.

### **2. ENUNCIADO DO PROBLEMA**

Um manipulador robótico simplificado pode ser representado por um conjunto de juntas (rotacionais ou prismáticas) conectadas por links (Fig. 1), acionado a partir de motores DC. O movimento da ferramenta (*end effector*) é programado de acordo com a aplicação, de sorte que a malha de controle do sistema de acionamento deve garantir que a posição e a velocidade das juntas atendam ao sinal de comando, respeitando os requisitos de desempenho.

Implemente o modelo de um manipulador robótico no MATLAB Simulink utilizando motores DC de ímãs permanentes, controlados através de servo-acionamento. Para isto, realize as seguintes etapas de projeto:

- a) Dimensionamento do motor e do conversor de potência;
- b) Projeto do servo-acionamento;
- c) Modelagem cinemática e dinâmica do manipulador robótico;
- d) Dimensionamento do acoplamento motor-robô;
- e) Integração do sistema e validação do projeto.



**Fig. 1.** Manipulador robótico PUMA 560: (a) imagem do manipulador real e (b) modelo cinemático correspondente (CRAIG, 2005).

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Dimensionamento do motor e do conversor de potência

Implemente o circuito de um motor DC acionado por uma ponte H. Utilize o bloco da máquina DC disponível no *SimPowerSystems*, ajustando os parâmetros para que o modelo se comporte como um motor de ímãs permanentes. As características da máquina são dadas por:

- Potência nominal: 5 hp;
- Velocidade nominal: 1750 rpm;
- Tensão nominal: 240 V;
- Resistência de armadura:  $R_a = 2,58 \, \Omega$ ;
- Indutância de armadura:  $L_a = 28 \, \text{mH}$ ;
- Inércia:  $J = 2,22 \times 10^{-2} \, \text{kg m}^2$ ;
- Atrito viscoso:  $B = 2,95 \times 10^{-3} \, \text{N m s}$ ;

Simule o circuito da ponte H utilizando MOSFETs chaveados por um esquema PWM bipolar, comparando uma tensão de controle  $v_{cont}$  a uma portadora triangular  $v_{tri}$ , resultando nos sinais de *gate* necessários para acionar as chaves com o *duty cycle*  $D$  adequado. Conecte um capacitor de filtro (capacitância  $C_f$ ) em paralelo com a carga para que a tensão nos terminais da armadura tenha um fator de forma aceitável.

Obtenha a resposta do sistema a um degrau de tensão de 240 V considerando o motor sem carga. Apresente as curvas de tensão  $v_a$  e corrente na armadura  $i_a$  em função do tempo, bem como os sinais de velocidade  $\omega_m$  e torque  $T_{em}$  do motor DC. Explique todos os procedimentos envolvidos e discuta os resultados.

### 3.2. Projeto do servo-acionamento

O servo-acionamento de um motor DC é caracterizado por duas malhas fechadas de controle, sendo um *loop* interno de corrente (necessária para limitar o torque em seu valor nominal) e uma malha externa de velocidade (responsável por governar a velocidade e, consequentemente, a posição das juntas).

O controlador de corrente deve ser projetado previamente à malha de velocidade, apresentando também uma resposta mais rápida em comparação à malha externa. A regulação é usualmente realizada por meio de um controlador PI que compara a corrente de referência  $i_a^*$  (proveniente do limitador de torque) à corrente de armadura  $i_a$ , gerando um sinal de erro  $e_i$ . Este erro deve ser traduzido no valor de *duty cycle*  $D$  necessário para produzir a tensão e a corrente de armadura necessárias.

Por sua vez, a malha externa deve reduzir o erro  $e_\omega$  entre a velocidade do rotor  $\omega_m$  e a referência  $\omega_m^*$ . O sinal proveniente da comparação é processado por um controlador PI e, posteriormente, convertido em um torque de referência (ou seja, a corrente de armadura  $i_a^*$ ).

Projete o controlador de corrente de modo a obter um erro estacionário menor do que 0,2 A e tempo de subida menor do que 100 ms. Apresente a resposta a um degrau unitário, evidenciando que os requisitos de desempenho do controlador foram devidamente atendidos.

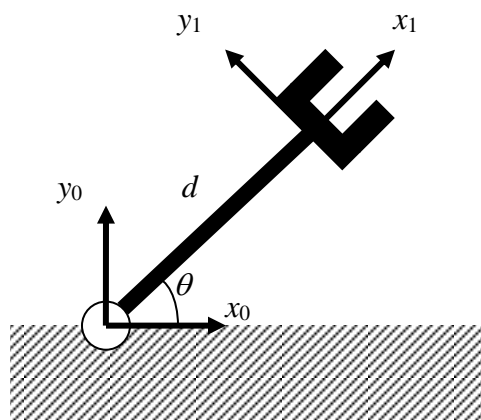
Em seguida, projete a malha de velocidade com erro estacionário menor do que 0,2 rad/s e tempo de subida menor do que 400 ms. Conecte um regulador de torque na saída do controlador (utilize o bloco *Saturation*) para limitar o torque máximo ao seu valor nominal. Apresente a resposta a um degrau de 100 rad/s, demonstrando o desempenho do sistema.

Apresente os valores de ganho proporcional e integral de cada controlador. Explique o procedimento realizado para dimensionar os ganhos.

### 3.3. Modelagem cinemática e dinâmica do manipulador robótico

Realize a modelagem mecânica do manipulador robótico. Visando a simplificação do projeto, o sistema mecânico foi reduzido a 1 junta rotacional e 1 link (Fig. 2). Evidentemente, as etapas descritas neste roteiro podem ser extrapoladas para a simulação de manipuladores com maior grau de complexidade. Os parâmetros mecânicos do robô são:

- Massa do link:  $m = 4$  kg;
- Comprimento do link:  $d = 60$  cm;
- Range da junta rotacional:  $[\theta_{\min}, \theta_{\max}] = [0, 90^\circ]$ ;



**Fig. 2.** Manipulador robótico de 1 grau de liberdade.

Primeiramente, obtenha o modelo cinemático direto do manipulador, ou seja, a posição da ferramenta  $\mathbf{X} = [x \ y]^T$  em função das coordenadas da junta  $\Theta = [\theta]$ ,  $\mathbf{X} = f(\Theta)$ . Apresente o gráfico do alcance do robô em termos das coordenadas da ferramenta em um eixo  $xy$ . Encontre também o modelo cinemático inverso do sistema, ou seja,  $\Theta = f^{-1}(\mathbf{X})$ . Note que, uma vez que o movimento do robô é condicionado a apenas 1 grau de liberdade, neste projeto, a trajetória do manipulador será definida diretamente no espaço da junta. Na prática, o controle é geralmente realizado em relação ao plano de trabalho (*workspace*) da ferramenta.

Uma vez definida a cinemática, obtenha as equações do modelo dinâmico do robô. Encontre o valor do torque  $\tau$  em função das coordenada das juntas  $\Theta$ . Lembre-se de considerar o efeito da gravidade durante a modelagem do sistema.

Apresente a resposta do robô (curvas de posição, velocidade e torque em função do tempo) para um deslocamento angular de  $\theta_{\min}$  a  $\theta_{\max}$  em intervalos  $T$  de 10, 5 e 1 s. Para isso, dimensione um perfil trapezoidal de velocidade, assumindo tempos de aceleração  $t_a$  de 10% do tempo total da trajetória. O tempo do patamar de velocidade é dado por  $t_p = T - 2t_a$ .

Explique todos os procedimentos realizados e comente os resultados.

### 3.4. Dimensionamento do acoplamento motor- robô

Em geral, as aplicações de manipuladores robóticos requerem velocidades relativamente baixas e elevados torques. Contudo, servo-acionamentos tipicamente são otimizados para produzir altas velocidades com torques diminutos. Neste contexto, é necessário instalar uma transmissão entre o eixo do motor e a junta para compatibilizar as grandezas envolvidas nos sistemas elétrico e mecânico.

Dimensione o sistema de acoplamento entre o motor DC e o manipulador robótico. Se necessário, verifique *datasheets* de fabricantes para especificar os parâmetros de projeto. Para fins de simplificação, ignore todas as perdas do acoplamento durante a implementação no Simulink.

### 3.5. Integração do sistema e validação do projeto

Obtenha a resposta do sistema para as seguintes trajetórias, considerando perfis trapezoidais de velocidade:

- Deslocamento de 0 a 90° em 10 s;
- Deslocamento de 0 a 70° em 5 s, seguido de retorno a 30° em 5 s;
- Deslocamento de 0 a 90° com incrementos de 10°, mantendo a ferramenta estacionária em cada posição por 2 s.

Para cada trajetória, apresentar os gráficos (em função do tempo) de posição ( $x$ ,  $y$  e  $\theta$ ), velocidade  $\omega$  e torque  $\tau$  da ferramenta, velocidade  $\omega_m$  e torque  $T_{em}$  do motor, tensão  $v_a$  e corrente  $i_a$  na armadura, e *duty cycle*  $D$  dos MOSFETs. Apresente também os gráficos de erro de posição  $e_\theta$  e velocidade  $e_\omega$ .

Explique os procedimentos realizados. Discuta a eficiência do sistema de acionamento implementado. Se necessário, faça o refinamento do projeto para aprimorar a resposta do servo-acionamento.

## 4. EXERCÍCIO COMPLEMENTAR (OPCIONAL)

### 4.1. Servo-acionamento com conversor dual trifásico

Refaça o projeto utilizando um conversor dual trifásico (retificadores controlados trifásicos em anti-paralelo) ao invés da ponte H. Uma vez que o controle dos tiristores é realizado com base no ângulo de disparo, é conveniente implementar uma rotina para linearizar o acionamento dos *gates*, visto que o sinal produzido pelo controlador PI é tipicamente linear.

Compare os resultados obtidos com cada sistema de acionamento (conversor dual ou ponte H) e discuta as vantagens e desvantagens de cada topologia.

## **BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA**

### *1. Eletrônica de potência e acionamento de motores*

FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S.D. **Electric Machinery**. New York: McGraw-Hill, 2003.

KRISHNAN, R. **Electric Motor Drives – Modeling, Analysis, and Control**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

MOHAN, N.; UNDELAND, T.M.; ROBBINS, W.P. **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**. New York: Wiley, 1995.

RASHID, M.H (Ed.). **Power Electronics Handbook**. San Diego: Academic Press, 2001.

SEN, P.C. **Principles of Electric Machines and Power Electronics**, New York: Wiley, 1989.

### *2. Manipuladores robóticos*

CRAIG, J.J. **Introduction to Robotics – Mechanisms and Control**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2005.

ROSARIO, J.M. **Princípios de Mecatrônica**. Sao Paulo: Prentice Hall, 2004.

SICILIANO, B.; KHATIB, O. (Ed.) **Springer Handbook of Robotics**. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

SICILIANO, B.; SCIAVICCO, L.; VILLANI, L.; ORIOLO, G. **Robotics – Modeling, Planning and Control**. London: Springer-Verlag, 2009.

SPONG, M.W.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M. **Robot Modeling and Control**. New York: Wiley, 2006.