

## Experiência 3

# Identificação de motor de corrente contínua com tacômetro

*Professores: Adolfo Bauchspiess e Geovany A. Borges*

O objetivo deste experimento é levantar o modelo dinâmico do conjunto atuador e motor de corrente contínua do módulo didático de motor CC. Supõe-se que este conjunto não pode ser identificado em separado, tal como ocorre em vários processos reais.

### 1-Introdução

No presente experimento, serão realizados procedimentos objetivando fazer o levantamento do modelo de segunda ordem correspondente a um conjunto atuador e motor de corrente contínua. Cada um dos elementos pode ser modelado por um sistema de primeira ordem com ganho de regime permanente e uma constante de tempo.

### 2-Modelo do processo

O processo a ter seus parâmetros identificados é obtido pela composição em série do módulo dinâmico, representando dinâmica do atuador, e o conjunto motor de corrente contínua e tacômetro. Esta composição é obtida conectando-se o sinal  $v_1(t)$  a  $u_2(t)$ , e tem como entrada  $e_1(t)$  e saída  $v_4(t)$ . Os componentes podem ser observados na Figura 1.

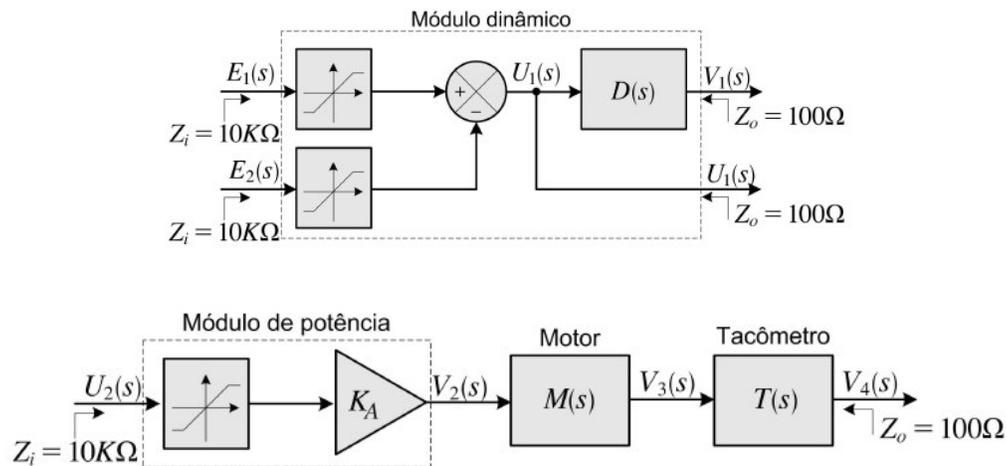


Fig.1 Componentes do kit didático do motor CC. As saturações das entradas do módulo dinâmico estão colocadas nos valores -10V e +10V. A entrada do processo tem saturação em -6V e +6V.

A parte linear do módulo dinâmico possui função de transferência de primeira ordem, com ganho de regime dado por  $K_a > 0$  e constante de tempo  $\tau_a > 0$ . Considera-se que estes parâmetros são os da dinâmica do atuador.

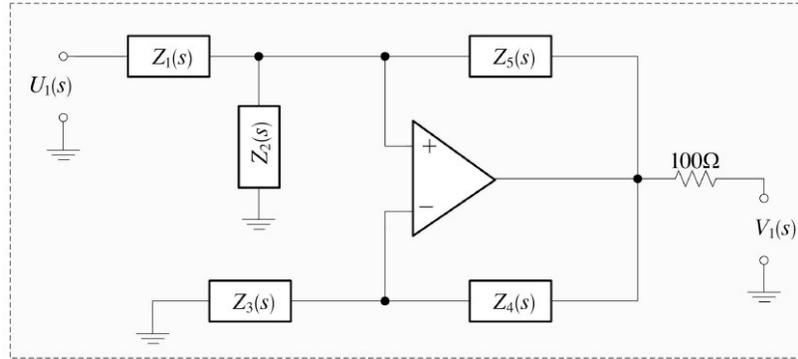


Fig.2 Circuito que implementa a função de transferência  $D(s)$  do módulo dinâmico.

Esta dinâmica é obtida por meio do circuito genérico da Fig. 2. No entanto, são usados os seguintes componentes:

- impedância  $Z_1(s)$ : resistor de valor  $R_1$
- impedância  $Z_2(s)$ : capacitor de valor  $C_2$
- impedância  $Z_3(s)$ : resistor de valor  $R_3$
- impedância  $Z_4(s)$ : resistor de valor  $R_4$
- impedância  $Z_5(s)$ : circuito aberto

Os valores destes componentes serão conhecidos pelos alunos somente no início do experimento.

Com relação ao processo, formado pelo módulo de potência, tacômetro (considerados de rápida dinâmica) e o motor de corrente contínua, considera-se que pode ser modelado por uma função de transferência de primeira ordem, com ganho de regime dado por  $K_m > 0$  e constante de tempo  $\tau_m > 0$ .

Assim, a função de transferência do sistema completo é dada por

$$\frac{V_4(s)}{E_1(s)} = \frac{K_a K_m}{(\tau_a s + 1)(\tau_m s + 1)}$$

O processo de identificação fará uso de um gerador de funções, para gerar uma onda em  $e_1(t)$ , e um osciloscópio para observar a resposta de  $v_4(t)$ . O objetivo do experimento será o de determinar o ganho de regime permanente em malha aberta ( $K_a K_m$ ) e a constante de tempo do motor  $\tau_m$ . Ele é dividido em dois procedimentos, descritos a seguir.

## 2.1 Procedimento de determinação do ganho de regime permanente em malha aberta

Para determinar o ganho de regime permanente em malha aberta, dado pelo produto  $K_a K_m$ , sugere-se aplicar diferentes tensões contínuas em  $e_1(t)$  com um gerador de funções, e obter

os respectivos valores de regime de  $v_4(t)$ . De posse destes valores, obtidos por meio de um osciloscópio ou multímetro, representados na forma de N pares de leituras  $\{E_{1,k}, V_{4,k}\}$ ,  $k = 1, \dots, N$ , o ganho de regime é dado pela tangente da reta que melhor passa por todos os pares de leituras, colocadas em um sistema de coordenadas  $E_1 \times V_4$ . Este procedimento, baseado em estimação paramétrica no sentido de mínimos quadrados, é mais confiável do que se basear em um único par de medidas, diante das incertezas dos instrumentos de medição. Para que este procedimento gere resultados confiáveis, deve-se certificar que não está ocorrendo saturação no circuito.

## 2.2 Procedimento de determinação da constante de tempo do motor

Sabe-se antecipadamente que a constante de tempo do atuador é maior que a do processo motor (atuador mais lento), mas a pouca dominância do pólo associado ao atuador torna pouco confiável fazer identificação simplesmente pela resposta ao degrau em malha aberta. Conhecendo-se os parâmetros do atuador, sugere-se que seja utilizado um circuito amplificador externo, com ganho  $K$  ajustável, e que realimenta a saída  $v_4(t)$  pela entrada  $e_2(t)$  do módulo dinâmico (c.f., Fig. 3). Desta forma, aplicando-se uma onda retangular em  $e_1(t)$  e iniciando-se com um baixo valor de  $K$ , o procedimento consiste em aumentar o ganho  $K$  até que se perceba que os pólos em malha fechada começam a deixar o eixo real (observado no osciloscópio na forma de sobre-passo na resposta  $v_4(t)$ ). Para este valor do ganho, denominado de  $K_l$ , obtém-se analiticamente o valor de  $\tau_m$  a partir do conhecimento de  $\tau_a$  e  $K_a K_m$  (estimados usando o procedimento da seção 2.1). Assim como no procedimento anterior, deve-se certificar que não está ocorrendo saturação no circuito.

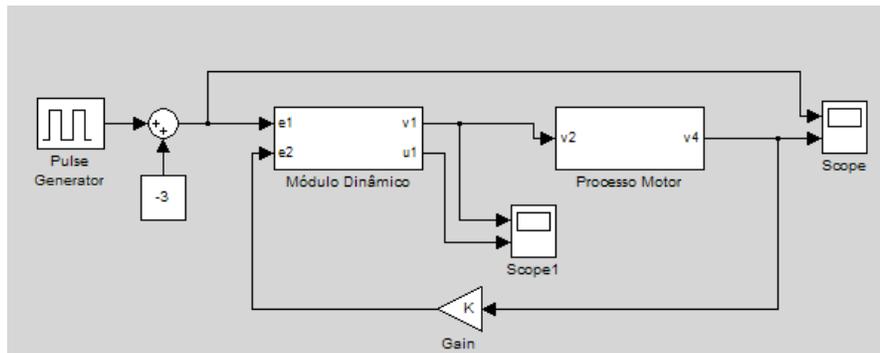


Fig.3 Conexão sugerida para o experimento de determinação da constante de tempo do motor.

Para implementar o amplificador, sugere-se o circuito da Fig. 4. Neste circuito,  $P_4$  é um potenciômetro linear de  $4700\Omega$ . Com este circuito, o ganho  $K$  do amplificador irá variar linearmente dentro do intervalo  $[K_{min}, K_{max}]$ , com

$$K_{min} = \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

$$K_{max} = K_{min} \left( 1 + \frac{4700}{R_3} \right).$$

Para projetar este amplificador de forma que seja útil no procedimento acima, deve-se primeiro determinar  $K_{min}$  e  $K_{max}$  de forma que  $K_l$  se encontre no intervalo  $[K_{min}, K_{max}]$ .

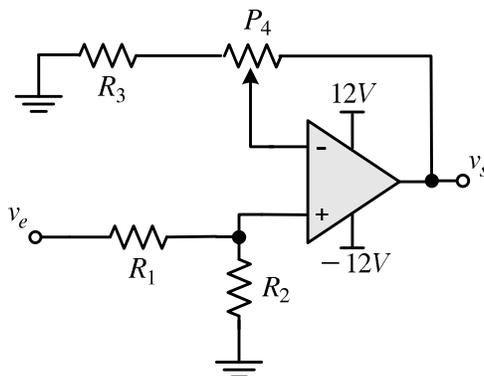


Fig.4 Circuito sugerido para o amplificador de realimentação usado na determinação da constante de tempo.

### 3 – Pré-relatório

Para este experimento, faz-se necessário **um pré-relatório para cada grupo**. O pré-relatório contempla as seguintes questões:

1. Considerando o circuito da Figura 2 e que  $Z_1(s) = R_1$ ,  $Z_2(s) = 1/sC_2$ ,  $Z_3(s) = R_3$ ,  $Z_4(s) = R_4$  e  $Z_5(s) = \infty$ , determine a fórmula analítica para determinar  $\tau_a$  e  $K_a$  em função dos valores destes componentes.
2. Faça um programa em Matlab que determine automaticamente  $K_a K_m$  a partir das seguintes medidas  $\{E_{1,k}, V_{4,k}\}$ ,  $k = 1, \dots, 12$ , dadas por

$E_1$	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$V_4$	-4,11	-3,43	-2,74	-2,09	-1,33	-0,64	-0,02	0,66	1,37	1,95	2,77	3,51	4,23

Sugestão: obtenha o polinômio de primeira ordem que melhor satisfaz os pontos medidos usando a função **polyfit**. Depois, mostre uma figura com os pontos medidos e a reta estimada, cujos valores são obtidos usando a função **polyval** avaliada em torno dos pontos  $E_1$ . Dentre os coeficientes do polinômio, qual deles corresponde à estimativa de  $K_a K_m$ ? O pré-relatório deverá constar da listagem do programa, que pode ser feita a mão.

3. De forma a auxiliar no procedimento da seção 2.2, determine de forma analítica o cálculo que determina  $\tau_m$  a partir de  $K_l$ ,  $\tau_a$  e  $K_a K_m$ .
4. Determine as equações que ajudarão a projetar o circuito da Fig. 4, usado no procedimento da seção 2.2. Para este projeto, deve-se primeiro determinar os limites de ganho  $K_{min}$  e  $K_{max}$ . Sugere-se usar  $K_{min} = 0,5K_l$  e  $K_{max} = 2,0K_l$ , em que  $K_l$  é escrito em função de  $\tau_m$ ,  $\tau_a$  e  $K_a K_m$ . No entanto,  $\tau_m$  ainda não é conhecido, uma vez que sua determinação dependerá da disponibilidade do amplificador. Para fazer um projeto de forma que possa ser usado em qualquer kit didático, sugere-se que o projeto considere

que  $0,01 < \tau_m < 0,04$ . Assim, para esta faixa de valores de  $\tau_m$ , determina-se analiticamente o menor valor de  $K_l$ , que será usado para calcular  $K_{min}$ , e o maior valor de  $K_l$ , usado para calcular  $K_{max}$ . O segundo passo consiste em determinar as resistências  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ . Deve-se respeitar apenas que  $R_1 + R_2 > 10000\Omega$  de forma que a impedância de saída de  $v_4(t)$  tenha um efeito mínimo no ganho do amplificador. E ainda, deve-se evitar (se possível) que tanto  $R_1$  como  $R_2$  sejam resistências acima de  $100000\Omega$ , de forma que o amplificador não sofra tanta interferência da corrente de polarização do amplificador operacional. Por fim, determine a pinagem do circuito a ser montado, considerando que será usado o circuito integrado TL074 da Texas Instruments.

#### 4-Procedimento de laboratório

Os seguintes procedimentos deverão ser seguidos neste experimento:

- 1) Determine  $\tau_a$  a partir dos valores dos componentes presentes no módulo dinâmico do kit didático.
- 2) Seguindo o procedimento da seção 2.1, realize o experimento de aquisição dos dados para determinar  $K_a K_m$ . Use valores para a tensão de entrada  $e_1(t)$  varrendo o intervalo de  $-4V$  a  $+4V$ . Monte uma tabela das medidas e, usando o programa feito para o pré-relatório, determine  $K_a K_m$ . Certifique-se de que não há saturação no módulo didático (tensões  $v_1$ ,  $u_1$  e  $v_4$ )
- 3) Monte o circuito amplificador projetado usando as equações do pré-relatório. Aplicando  $1V$  na sua entrada  $e_1$ , verifique a faixa de ganho ao variar o potenciômetro  $P_4$ .
- 4) Seguindo o procedimento da seção 2.2, feche a malha e varie o ganho  $K$  até identificar que os pólos em malha fechada estejam no limite de deixar o eixo real. A tensão de entrada  $e_1(t)$  deverá ser uma onda retangular no intervalo de  $-3V$  a  $+3V$ . Determine  $\tau_m$  a partir de  $K_l$ ,  $\tau_a$  e  $K_a K_m$ .

Anote os dados necessários para fazer o relatório. O pré-relatório será recolhido ao final do experimento.

#### 5-Relatório

O relatório deve apresentar de forma clara e direta um relato do que foi realizado no laboratório, fazendo uso sempre que possível de rigor teórico para explicar os procedimentos seguidos. São componentes importantes do relatório uma análise crítica dos resultados e das condições de experimentação.