

Laboratório de Controle de Sistemas

Profa. Grace S. Deaecto

Faculdade de Engenharia Mecânica / UNICAMP
13083-860, Campinas, SP, Brasil.
grace@fem.unicamp.br

Primeiro Semestre de 2023

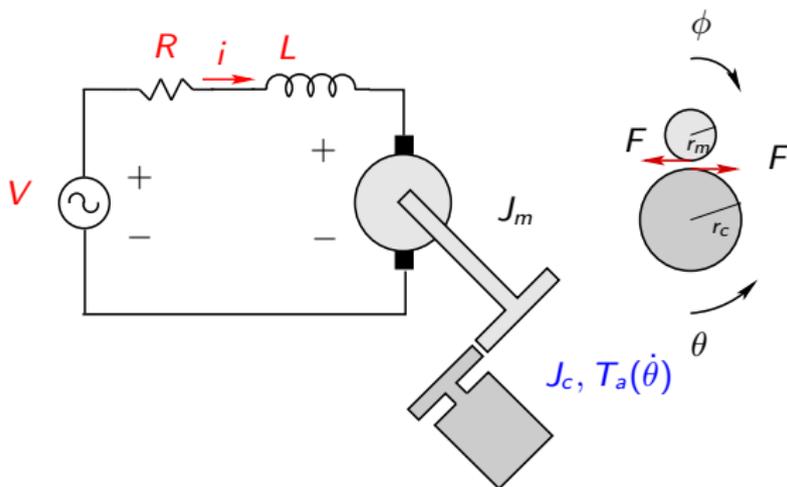
- 1 Experimento 8
 - Objetivo
 - Conceitos fundamentais
 - Roteiro

Experimento 8

Identificação de um motor de corrente contínua

Objetivo

O objetivo deste experimento é realizar a identificação dos parâmetros de um motor de corrente contínua com excitação independente de ímã permanente. A figura a seguir apresenta um esquema do motor com suas partes elétrica e mecânica.

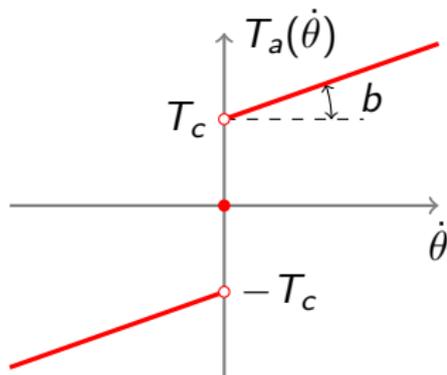


Conceitos fundamentais

O atrito considerado é composto por uma componente de atrito viscoso e uma componente de atrito de Coulomb, sendo

$$T_a(\dot{\theta}) = b\dot{\theta} + T_c \text{sign}(\dot{\theta})$$

Esta função é esboçada na figura a seguir



Conceitos fundamentais

- O modelo matemático pode ser obtido da seguinte maneira :
 - **Parte Elétrica** : Com a fonte de tensão V , temos

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V - K_T \dot{\phi} \quad (1)$$

- **Parte Mecânica** : O motor gera um torque total $T = K_T i$ que é transferido à carga através do rotor. Logo, temos

$$J_m \ddot{\phi} = K_T i + Fr_m, \quad J_c \ddot{\theta} + T_a(\dot{\theta}) + Fr_c = 0 \quad (2)$$

A partir da relação $r_m \phi = r_c \theta$ e definindo $c = r_c / r_m$, obtemos

$$(J_c + c^2 J_m) \ddot{\theta} + T_a(\dot{\theta}) = c K_T i \quad (3)$$

Definindo $\nu = \dot{\theta} \geq 0$ como a velocidade angular da carga e considerando que para este caso $T_a(\dot{\theta}) = b\dot{\theta} + T_c$ temos

$$\hat{\nu} = \frac{(Ls + R) \hat{T}_c + c K_T \hat{V}}{(J_c + c^2 J_m) L s^2 + ((J_c + c^2 J_m) R + bL) s + Rb + (c K_T)^2}$$

Conceitos fundamentais

- Definindo o momento de inércia do conjunto motor-carga como $J = J_c + c^2 J_m$ e a constante $cK_T = K$ temos

$$\hat{v} = -G_T(s)\hat{T}_c + G(s)\hat{V}$$

em que

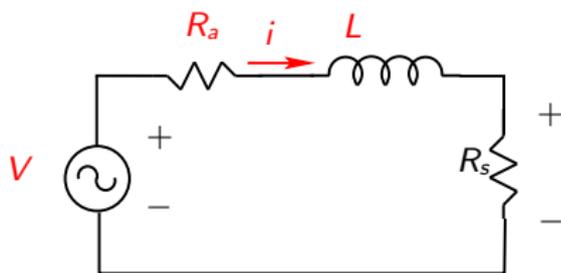
$$G_T(s) = \frac{(Ls + R)/JL}{s^2 + \left(\frac{R}{L} + \frac{b}{J}\right)s + (Rb + K^2)/JL}$$

$$G(s) = \frac{(K/JL)}{s^2 + \left(\frac{R}{L} + \frac{b}{J}\right)s + (Rb + K^2)/JL}$$

Para a identificação dos parâmetros do motor R [Ω], L [H], K [volts.s], b [N.m.s], T_c [N.m] e J [kg.m²] serão realizados dois ensaios sendo um deles com o **motor parado** e o outro com o **motor em movimento** em que as variáveis medidas serão a **corrente de armadura i** e a **velocidade angular ν** .

Conceitos fundamentais

- Motor parado** : Com o eixo travado forçando $\nu(t) = 0, \forall t \geq 0$, não existe força contra-eletromotriz. Para a medir a corrente de armadura i , adiciona-se um resistor R_s , obtendo-se o circuito RL mostrado na figura



sendo R_a a resistência de armadura. Deve-se notar que, neste caso, $R = R_a + R_s$. A relação entre \hat{V} e a saída \hat{i} é dada por

$$\hat{i} = \frac{1/L}{s + R/L} \hat{V}$$

Conceitos fundamentais

- Para uma tensão de entrada do tipo degrau de amplitude V_0 temos

$$i(t) = \frac{V_0}{R}(1 - e^{-(R/L)t})$$

- Em regime permanente $i_\infty = I_0 = V_0/R$ e, portanto

$$R = \frac{V_0}{I_0}$$

sendo que a corrente I_0 é medida. Note que o tempo para que a resposta atinja 63% do seu valor de regime é a constante de tempo da parte elétrica $i(\tau_e) = 0.63I_0$. Assim, temos $\tau_e = L/R$ e, portanto

$$L = \tau_e R$$

Conceitos fundamentais

- É importante ressaltar que o procedimento adotado para identificar os parâmetros elétricos do motor, requer alguns cuidados importantes.
- Com o rotor travado, é imperativo alimentar a armadura com uma tensão constante suficientemente baixa para que a corrente não ultrapasse o valor especificado pelo fabricante.

Conceitos fundamentais

- **Com motor em movimento** : Deseja-se encontrar a constante de torque do motor K , o coeficiente de atrito viscoso b e o atrito de Coulomb T_c . De fato, aplicando um degrau de amplitude V_0 na entrada, temos que em regime permanente, o indutor se comportará como um curto-circuito e, portanto, utilizando a equação (1) para o sistema com R_s e o fato que $\phi = c\theta$, temos

$$K = \frac{V_0 - Ri_\infty}{\nu_\infty}$$

sendo i_∞ e ν_∞ os valores de regime permanente.

- Utilizando a equação (3) dada por $J\dot{\nu} + b\nu = Ki - T_c$ podemos notar que no regime permanente $\dot{\nu} = 0$. Assim, aplicando N valores diferentes de tensão V , obtemos um conjunto de dados $T_\infty^k = K^k i_\infty^k = T_c + b\nu_\infty^k$, com $k = 1 \dots, N$.

Conceitos fundamentais

- Com o conjunto de dados obtidos, podemos ajustar uma curva como apresentada no slide 5, obtendo os coeficientes de atrito b e T_c desejados.
- Após o regime permanente, interrompendo a corrente, temos que $J\dot{\nu} + b\nu = -T_c$ com $\nu(0) = \nu_\infty$. Neste caso,

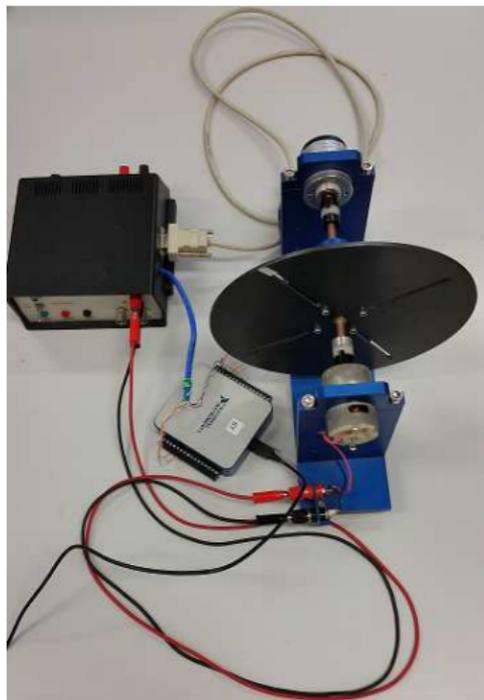
$$\nu(t) = \left(\nu_\infty + \frac{T_c}{b} \right) e^{(-b/J)t} - \frac{T_c}{b}$$

e, portanto, podemos determinar o valor de J . De fato, considerando $t_J = J/(4b)$ obtemos

$$\nu(t_J) = (\nu_\infty + T_c/b)e^{(-1/4)} - T_c/b$$

Logo, a partir de $\nu(t_J)$ identificado no gráfico, obtemos t_J e, portanto, o valor $J = 4bt_J$.

Esquema a ser montado no laboratório



Roteiro

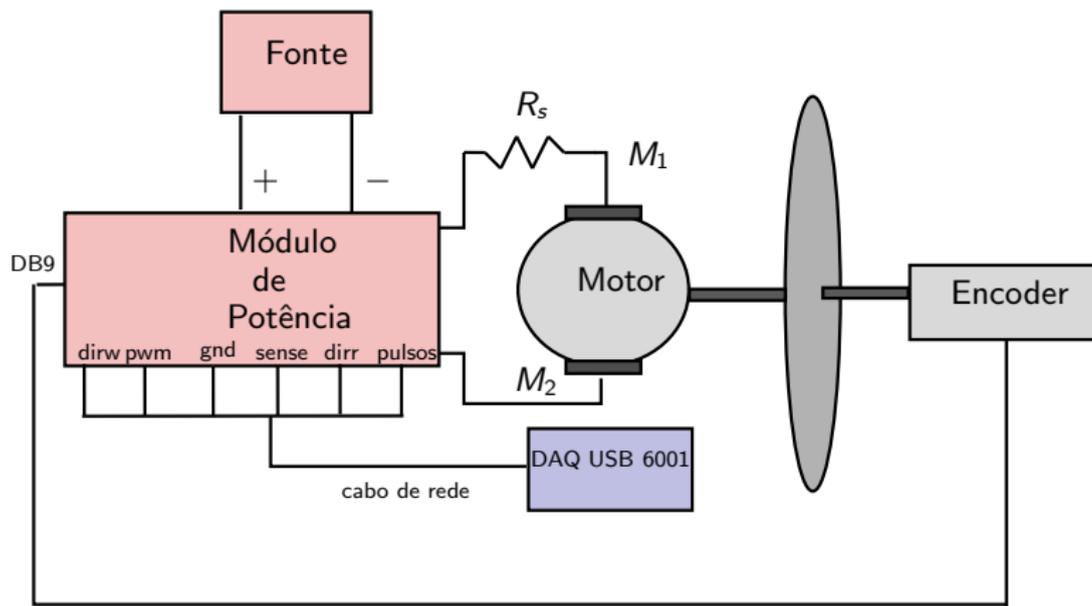
Materiais :

- Módulo de potência
- Kit didático contendo motor, encoder e disco
- Fonte externa variável
- Placa DAQ NI-USB 6001
- 2 cabos do tipo banana
- 1 cabo DB9

Roteiro

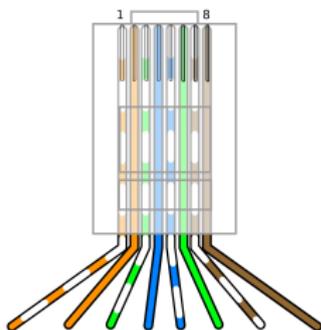
Procedimento :

- Realize a montagem esquematizada na figura seguinte



Roteiro

- Utilize a tabela abaixo para realizar as conexões do cabo de rede na placa DAQ USB NI-6001



Fios	Ligação
Branco Laranja	dirr
Laranja	pulsos
Branco Verde	NC
Azul	dirw
Branco Azul	pwm
Verde	NC
Branco Marrom	sense
Marrom	GND

- Os sinais dirr e dirw representam a direção de rotação do motor lida ou escrita no módulo de potência, respectivamente.
- Para este experimento o sinal dirw deve ser conectado no canal GND da DAQ.

Roteiro

- O sinal sense corresponde à tensão medida sobre a resistência $R_s = 1 \text{ } [\Omega]$ que é igual à corrente que passa através dela.
- Note que o único contador da placa DAQ 6001 possui duas opções de entrada P2.0 ou P1.1 e, desta forma, o fio laranja deve ser conectado em um deles.
- Não esqueça de conectar o GND na DAC.

Procedimento

- Realize as conexões necessárias entre a placa de aquisição e o módulo de potência.
- Conecte os cabos bananas entre a entrada do motor e as saídas M_1 e M_2 do módulo de potência.
- Conecte o cabo DB9 entre o módulo de potência e o encoder localizado no kit didático.

Roteiro

- Ajuste a fonte variável para uma tensão de $V_0 = 14$ [volts].
- Elabore um programa em LabVIEW para medir a corrente que passa pela resistência R_s (como já mencionado, esta resistência já está dentro do módulo de potência e vale $1 [\Omega]$). Basta medir a saída do canal “sense”.
- Implemente o programa utilizando o “timed-loop” no lugar do “while loop” e configure “ $dt = 10$ ” [ms].
- No programa em Labview acrescente uma saída analógica de forma a enviar uma tensão constante de 4 [volts] no sinal pwm. Esta tensão é, na verdade, equivalente ao nível lógico 1, indicando que o pwm está com 100 % de *duty cycle*.

Roteiro

Motor parado :

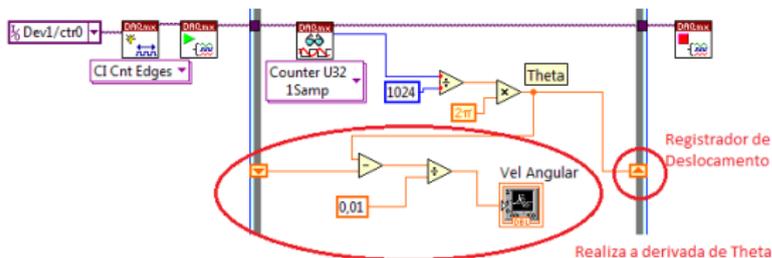
- Trave o rotor e, com o programa de aquisição em execução, ligue subitamente o módulo de potência de forma a alimentar o motor e capturar a subida do sinal de corrente.

Motor em movimento :

- Para a obtenção da velocidade angular em [rad/s] realize o seguinte procedimento :
 - Altere o programa para que o mesmo leia também a posição dada pelo encoder. Utilize o bloco “DAQmx Create Virtual Channel” com a configuração Counter Input/Count Edges e indique a opção Devx/ctr0.
 - Conecte o bloco anterior em “DAQmx Read” com a configuração Counter/Single Sample/U32.

Roteiro

- De acordo com a especificação do encoder, uma volta completa do disco corresponde a 1024 pulsos lidos. Utilizando o Labview, converta os pulsos lidos para ângulo θ em [rad]. Calcule e plote a velocidade angular ν desejada. Veja esquema abaixo.



- Para valores de tensão de entrada $V_0^k \in \{16, 14, 12, 10\}$ [volts] obtenha os sinais de corrente e velocidade angular até o motor atingir o regime permanente. Para cada tensão e com o motor ainda em operação, aplique 0 [volts] no sinal de pwm e continue a aquisição até a parada gradual do motor.

Roteiro

- Para a identificação das constantes de atrito viscoso b e de Coulomb T_c , obtenha a curva da página 5, armazenando para cada ensaio a velocidade angular do motor em regime permanente ν_∞^k bem como a corrente associada i_∞^k . Utilizando estes pontos $(\nu_\infty^k, K^k i_\infty^k)$ podemos obter a reta que melhor se ajusta ao conjunto de dados, conforme indicado na página 11.
- O valor de K é a média aritmética de K^k .
- O valor de J é a média aritmética dos momentos J^k calculados como descrito na página 12.

Roteiro

- Para a validação do modelo, obtenha a representação de estado do sistema considerando as equações (1) e (3) reescritas aqui por conveniência

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V - K\dot{\theta} , \quad J\dot{\nu} + b\nu = Ki - T_c$$

- Considere

$$x = \begin{bmatrix} i \\ \nu \\ \theta \end{bmatrix} , \quad y = \begin{bmatrix} i \\ \nu \end{bmatrix} , \quad u = \begin{bmatrix} V \\ T_c \end{bmatrix}$$

- Utilizando o princípio da superposição para as entradas V e T_c , plote em um mesmo gráfico os valores teórico e experimental da corrente. Realize o mesmo para os valores teórico e experimental da velocidade angular.
- Discuta e conclua sobre os resultados obtidos.

Roteiro

- A figura a seguir mostra um esquema da tela de execução.

