

Instituto Superior Técnico
Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Controlo

2003/2004

Controlo de velocidade de um motor D.C.

Realizado por :

*E. Morgado*¹ e *F. M. Garcia*² - Março de 2003

*E. Morgado*¹ e *J. Gaspar*² - Outubro de 2003

¹Centro de Física Molecular/Instituto Superior Técnico

²Instituto de Sistemas e Robótica/Instituto Superior Técnico

I – Notas preliminares

O relatório da componente teórica do trabalho deve ser entregue no fim da aula de laboratório. O relatório da componente experimental pode ser entregue até 1 semana após a realização do trabalho na caixa de correio da Secção de Sistemas e Controlo (Torre Norte, 5 piso, em frente à sala 5.17). Entregas fora deste prazo serão penalizadas.

É fundamental que cada grupo traga folhas de papel semilogarítmico para a aula de laboratório.

II – Objectivos

- Modelização e identificação de um sistema real.
- Resposta em frequência de amplitude.
- Resposta no tempo e análise no plano s .
- Projecto de um controlador analógico.

III – Introdução

O laboratório dispõe do seguinte equipamento:

- Motor de corrente contínua (DC) com taquímetro acoplado.
- Montagem que inclui um amplificador de tensão e um amplificador de potência.
- Placas de conversão A/D e D/A, ligadas a um PC.
- Gerador de ondas sinusoidais, quadradas e triangulares.
- O PC tem instalado um software que permite a visualização de sinais provenientes do sistema real (©J. Sanches).

Este equipamento permite a montagem, análise e projecto do sistema de controlo de velocidade de um motor DC.

IV – Preparação teórica a realizar antes da sessão de laboratório

Esta secção aborda o estudo teórico do sistema representado na Figura 1.

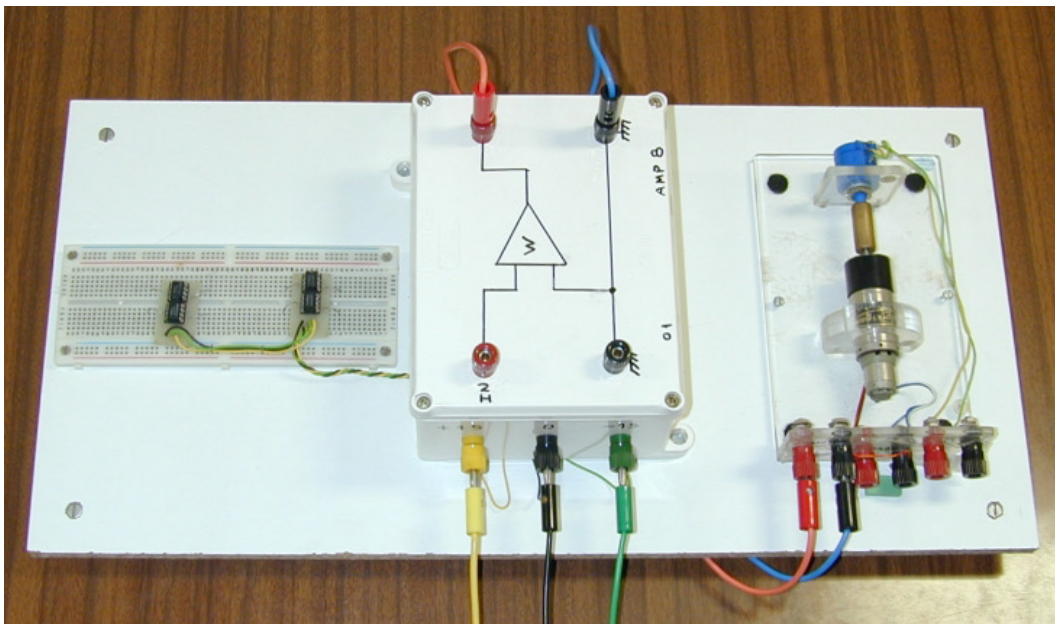


Figura 1: Montagem experimental com amplificador de potência, motor, taquímetro e placa de controlo analógico.

1) Considere o esquema simplificado de um motor DC de imã permanente (semelhante ao utilizado no laboratório) apresentado na figura 2, onde os símbolos indicados corespondem às seguintes grandezas físicas:

- T - Binário do motor.
- J_m - Momento de inércia referido ao eixo do motor.
- K_e - Constante eléctrica.
- R_a - Resistência do circuito de armadura (rotor).
- L_a - Indutância do circuito de armadura.
- i_a - Corrente do circuito de armadura.
- θ_m - Posição angular do veio do motor.
- v_a - Tensão aplicada nos terminais do motor.
- e - Força (tensão) contra-electromotriz

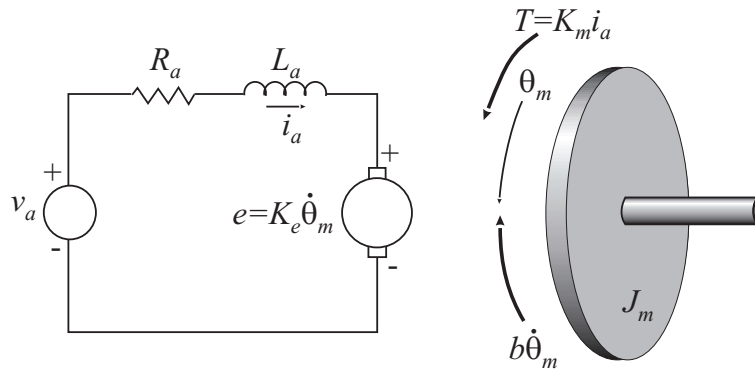


Figura 2: Esquema simplificado de um motor DC.

Considere que a aceleração angular do veio, a velocidade angular do veio e a corrente do circuito de armadura se relacionam pela seguinte expressão:

$$J_m \ddot{\theta}_m = K_m i_a - b \dot{\theta}_m,$$

em que K_m e b denotam, respectivamente, a constante de binário e o coeficiente de atrito viscoso. Calcule as funções de transferência que relacionam a tensão aplicada aos terminais do motor com i) a posição angular do veio do motor e ii) a velocidade angular do veio do motor. Simplifique as funções de transferência assim obtidas considerando que a indutância do circuito de armadura é desprezável.

2) Considerando que o amplificador de potência e o taquímetro já estão incluídos (modelados) no circuito eléctrico e no modelo mecânico da figura 2 então o sistema constituído pelo amplificador de potência, motor e taquímetro é representado em boa aproximação por uma função de transferência de 1ª ordem

$$G(s) = \frac{K_0}{1 + s\tau}.$$

Relacione K_0 e τ com as constantes indicadas na alínea anterior. Determine os valores de K_0 e τ em função da resposta ao escalão nos instantes $t = \tau$ e $t = +\infty$.

3) Considere o sistema de controlo de velocidade em malha fechada com realimentação negativa representado na Figura 3. Admita para já que $C(s) = K$ (controlador Proporcional). Calcule a constante de tempo e o erro em regime permanente (ou seja, o valor de $e(+\infty)$ quando em v_{ref} se aplica um escalão unitário) do sistema realimentado em função de K , K_0 e τ .

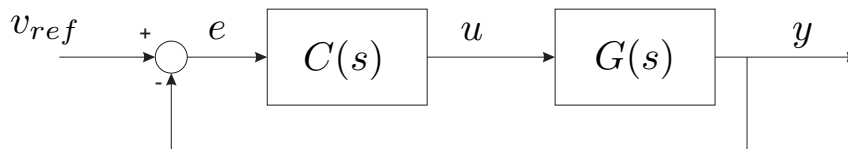


Figura 3: Diagrama de retroacção para controlo de velocidade.

4) Considere agora que $C(s)$ corresponde a um controlador Proporcional-Integral (PI), com função de transferência

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right).$$

Mostre que este controlador PI pode ser implementado pelo circuito da Figura 4, em que se admite a aproximação ideal para os AMPOPs. Calcule os valores de K_p e T_i em função do valor das resistências R_1 , R_2 e R_3 , e dos condensadores C_1 e C_2 .

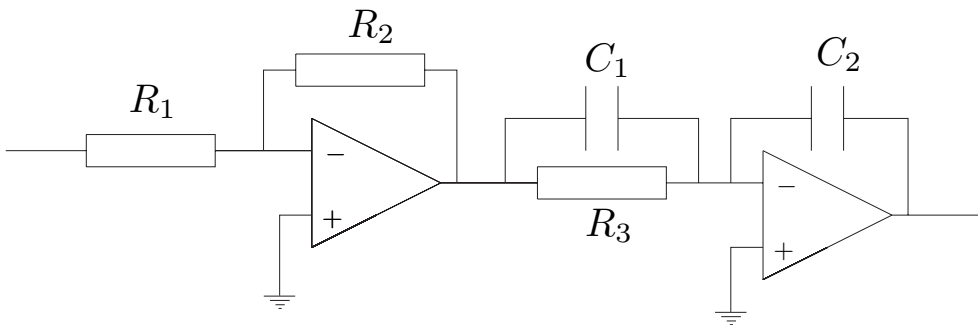


Figura 4: Montagem do controlador PI.

Admita que os pólos do sistema em cadeia fechada são dominantes, e calcule os seus valores numéricos de forma a que o sistema em cadeia fechada cumpra as seguintes especificações:

- Sobreelevação = 20%
- Tempo de pico = 20 ms

5) Considere ainda o controlador PI e que existem ganhos na retroacção, H e no sinal de referência, K_r (ver figura 5). Qual o valor da resposta ao escalão unitário, y quando $t \rightarrow +\infty$, $K_r = 1$ e $H = 1.1$ ou $H = 0$? No caso de $H = 1.1$, como pode ser obtido $y_\infty = 1$ mantendo as especificações da alínea anterior? Realize as simulações indicadas em Apêndice para apoio da resposta. Interprete os resultados obtidos.

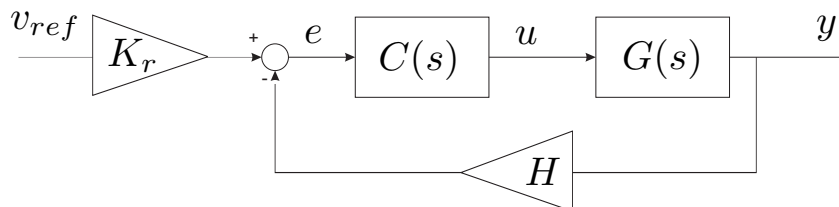


Figura 5: Diagrama de retroacção para controlo de velocidade. Ganho de retroacção não unitário.

V – Trabalho a realizar durante a sessão de laboratório

- 1) Observe a resposta do sistema (amplificador de potência + motor + taquímetro) a um escalão (gerado pelo computador) com amplitude de 1V. Determine experimentalmente os parâmetros da função de transferência.
- 2) Utilizando o gerador de sinais, determine a resposta em frequência de amplitude (na banda de 5 a 500 rads^{-1}). Coloque os valores observados numa folha de papel semilogarítmico. Desenhe na folha de papel semilogarítmico as assíntotas da resposta em frequência de amplitude do sistema. Determine o valor da frequência de corte e do ganho estático. Compare os valores obtidos com os da resposta ao escalão da pergunta anterior e comente os resultados.
- 3) Implemente o sistema de controlo de velocidade com realimentação negativa e **controlador Proporcional** de acordo com o diagrama da Figura 6. A partir do valor da constante de tempo em cadeia aberta obtido em 1), calcule o valor de K de forma a que as constantes de tempo em cadeia fechada sejam de 10 ms. e 5 ms. Determine os correspondentes valores de resistências, observe e esboce as respostas ao escalão em cadeia fechada. Meça os parâmetros do sistema (incluindo o ganho estático) em cadeia fechada e compare-os com os valores esperados. Comente os resultados na globalidade.

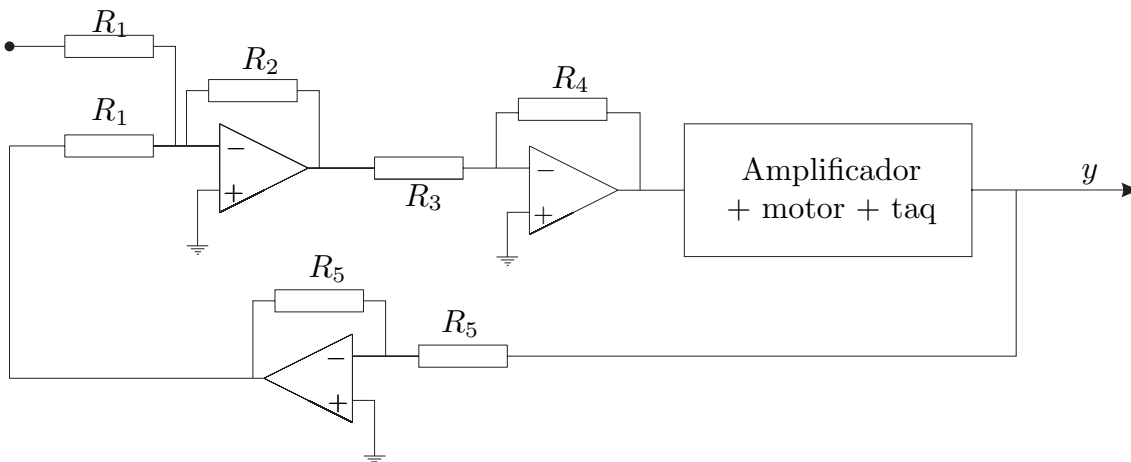


Figura 6: Montagem do circuito realimentado com o controlador proporcional.

- 4) Determine os valores das resistências e condensadores da montagem da Figura 4 de forma a satisfazer as especificações desejadas para a resposta ao escalão em cadeia fechada com o **controlador PI** a partir dos resultados obtidos em IV-4). Implemente o sistema em cadeia fechada, de acordo com o esquema da Figura 7. Observe e esboce as respostas ao escalão em cadeia fechada, e repita as experiências efectuadas modificando o valor de K_p para o dobro e para metade do valor original. Compare os resultados obtidos com os esperados, e comente-os.

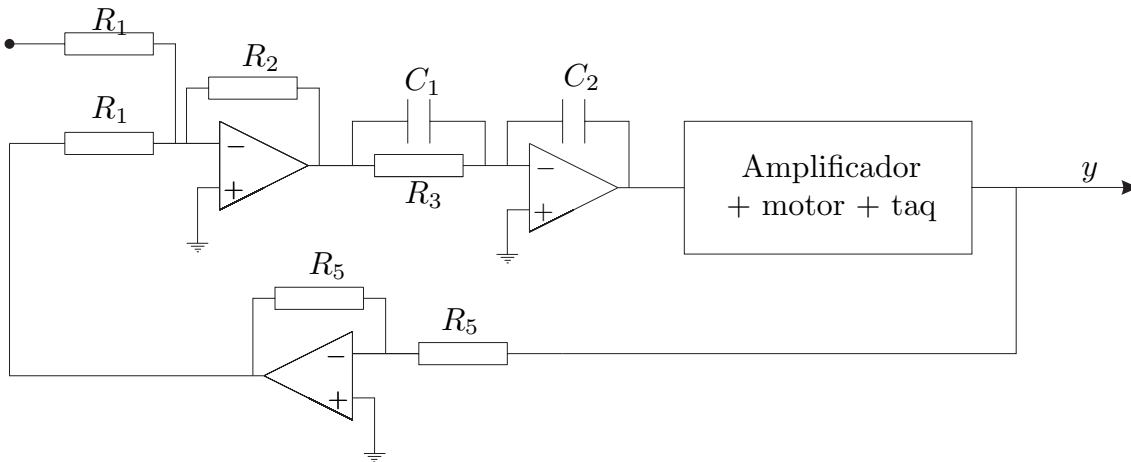


Figura 7: Montagem do circuito realimentado com o controlador PI.

5) Considerando o controlador PI dimensionado na alínea anterior, altere as leituras do taquímetro substituindo a resistência R_5 que realimenta o AmpOp, pela série $R_5 + 0.1 \times R_5$. Observe a resposta ao escalão e comente os resultados obtidos. Sugira novos valores na amplificação do sinal de referência e no controlador (R_1 , R_2 , R_3 , C_1 e C_2) de modo a obter uma resposta ao escalão unitário com regimes permanente e transitório iguais aos observados antes da alteração das leituras do taquímetro.

VI – Relatório

O relatório deve ser elaborado em duas partes, correspondendo cada uma às secções IV – e V – deste enunciado. As respostas devem ser sucintas. Na parte teórica, todos os resultados apresentados devem ser devidamente justificados. Os comentários da parte experimental devem ser apoiados nas respostas observadas e/ou nos resultados teóricos. Não se esqueça de juntar ao relatório a folha de papel semilogarítmico com o diagrama de Bode de amplitude do sistema estudado. Relembra-se que no final do semestre, e de acordo com as regras de avaliação, poderá haver uma discussão oral.

Apêndice: Simulação de controlo PI de um motor DC

Para realizar a simulação de controlo PI de um motor DC, começar por construir em *Matlab/Simulink* o diagrama de blocos da figura 8 e gravar com o nome "motor_ctrl_pi". As variáveis incluídas no diagrama de blocos, τ , K_0 , K_p , T_i , H e K_r , permitem variar facilmente parâmetros do sistema a partir do comando de linha do Matlab.

Nos motores utilizados no laboratório, a constante de tempo, τ tem valores tipicamente entre 17ms e 25ms, e o ganho estático, K_0 toma valores entre 0.5 e 0.7. Nas experiências seguintes usa-se como exemplo $\tau = 22ms$ e $K_0 = 0.5$.

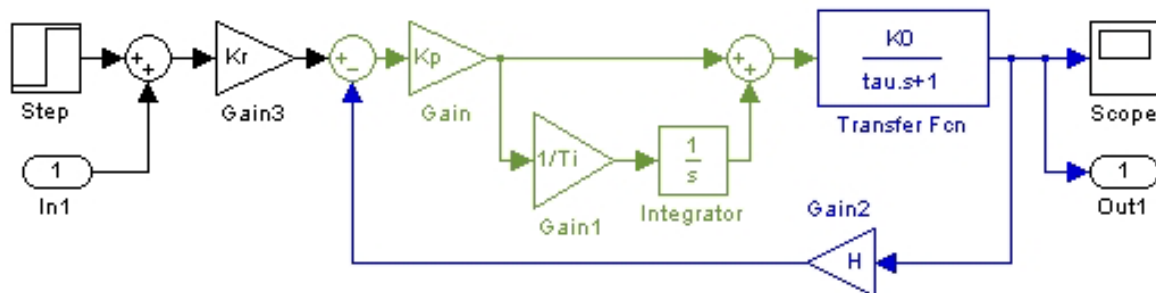


Figura 8: Diagrama Simulink de controlo PI de um motor DC.

1) Observação das constantes que caracterizam o motor

A resposta do motor ao escalão obtém-se (ver fig. 8): tornando unitário o ganho no sinal de referência ($K_r = 1$), desligando a realimentação ($H = 0$) e transformando o controlador num ganho unitário ($K_p = 1$ e $T_i = \infty$).

Para observar os valores de τ e de K_0 , a simulação deve cobrir várias constantes de tempo desde o momento do escalão. Sugere-se realizar simulações entre $t = 1\text{seg}$, instante inicial dos escalões em *Simulink*, e $t = 1.2\text{seg}$:

```
>> tau=22e-3; K0=0.5; Kp=1; Ti=inf; H=0; Kr=1;
>> [t,tmp,y]= sim('motor_ctrl_pi', [1 1.2]);
>> plot(t,y,'.-')
```

2) Verificação dos pólos do sistema controlado

Para observar os pólos do sistema controlado é necessário obter a função de transferência entre os blocos In1 e Out1 (ver fig. 8). O código seguinte permite obter a função desejada, ver a resposta ao escalão e observar os pólos:

```
>> tau=22e-3; K0=0.5; Kp=2.0; Ti=0.005; H=1; Kr=1;
>> [a,b,c,d]= linmod('motor_ctrl_pi');
>> [n,d]= ss2tf(a,b,c,d,1); s= minreal(tf(n,d)); step(s)
>> polos_cf= pole(s)
```

Nota: nesta alínea e na alínea seguinte os valores de K_p e T_i devem ser alterados para serem cumpridas as especificações do trabalho.

3) Variação do ganho de realimentação

Os comandos seguintes variam o ganho de realimentação, H e mostram os resultados num gráfico:

```
>> tau=22e-3; K0=0.5; Kp=2.0; Ti=0.005; Kr=1;
>> H=1.0; [t1,tmp,y1]= sim('motor_ctrl_pi', [1 1.1]);
>> H=1.1; [t2,tmp,y2]= sim('motor_ctrl_pi', [1 1.1]);
>> plot(t1,y1,'b.-',t2,y2,'ro-')
```

Como compensar a alteração de H ?