

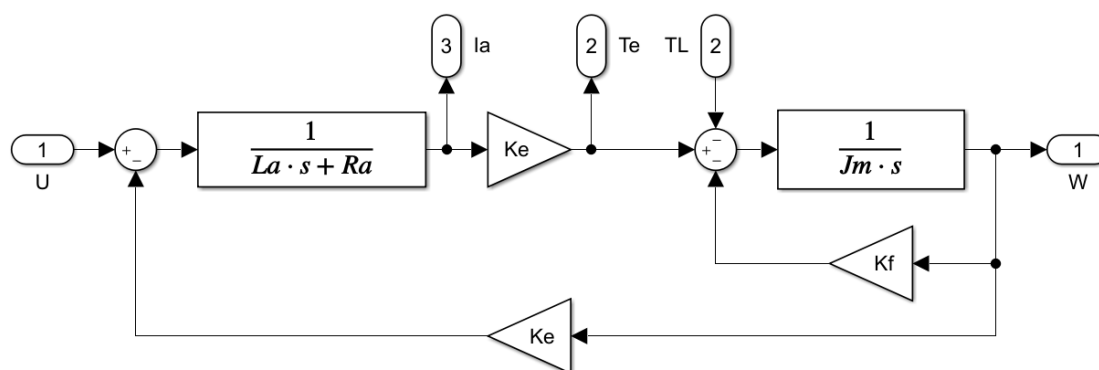
## CCEE - Controlo por Computador no Espaço de Estados 2021/2022

### TP1-Trabalho Prático nº1

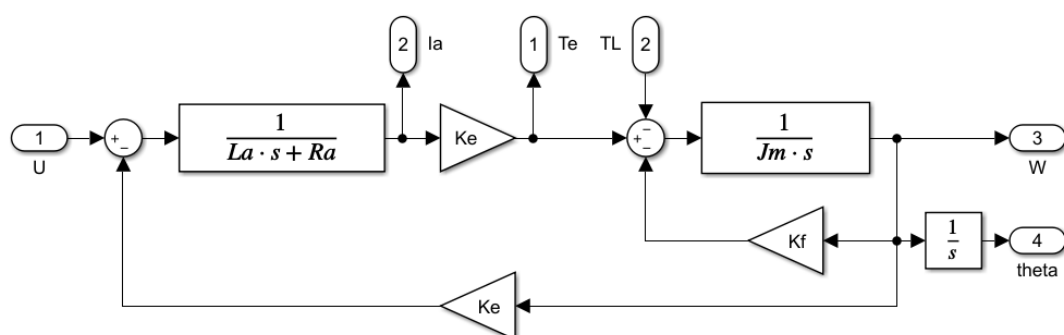
Controlo por Computador (PI e no Espaço de Estados) de um Motor DC: Simulação e Aplicação num MinSegMotor Kit

#### Parâmetros e Modelo de circuito do Motor DC

Considere o motor DC disponível no kit MinSegMotor, definido pelos seguintes parâmetros:  $J_m=1.3475e-06$  Kg.m<sup>2</sup>;  $R_a=8$  Ohm;  $K_e=0.0159$  N.m/A;  $K_f=0.000001176$  N.m.s;  $L_a = 0$  H;  $h=0.03$  s. (nota:  $K_f \equiv B_m$ )



**Modelo A:** com entradas U (Tensão) e TL (perturbação) e com saídas de velocidade (W), binário eléctrico (Te) e corrente do induzido (Ia)



**Modelo B:** com saída adicional referente à posição angular do veio do motor (theta)

**Figura 1:** Modelo de circuito do motor DC. Modelo B: inclui saída relativa à posição angular do veio do motor (theta); Modelo A: sem saída da posição angular do veio do motor.

## PARTE I: Controlador PI, Simulação (Matlab & Simulink)

A título de exemplo considere os sistemas de controlo ilustrados na Fig. 2 (controlo de velocidade com controlador PI contínuo) e Fig.3 (controlo de velocidade com controlador PI discreto, para  $h=0.03s$ ). Na Fig.4 apresentam-se sinais obtidos por simulação dos sistemas de controlo para  $K_p=0.0271$  e  $K_i=0.2712$ . Considerou-se como referência de velocidade, um sinal em forma de rampa com valor final de 60 rad/s (valor final=60 no módulo “Step” e limite superior de saturação = 60 no módulo “Integrador”). O sinal de comando à entrada do motor (U) tem de contido no intervalo  $[-4.8, 4.8]$  volts.

- 1) Ajuste os diagramas de Simulink das Fig.2 e Fig.3, considerando agora o modelo B de Simulink do motor. Continue a considerar  $K_p=0.0271$  e  $K_i=0.2712$ . Utilize, como referência de velocidade, um sinal em forma de rampa com valor final de -70 rad/s (e mantenha o declive da rampa, mas agora declive negativo). Aplique de forma exclusiva: i) perturbação no binário de carga (entrada TL) em step (valor final: 0.002; step time: 5s); ii) perturbação na entrada (U) em step (valor final: 2V; step time: 5s); Faça a simulação dos dois sistemas de controlo (controladores PI contínuo e discreto). Apresente sinais de simulação ( $t=0 \dots 6s$ ) da resposta em velocidade, comando de tensão e outros considerados pertinentes. Analise e comente os resultados.
- 2) Caracterize a dinâmica no domínio contínuo (fator de amortecimento e frequência natural não amortecida) do sistema de controlo com controlador PI contínuo (Fig. 2). Mantendo o fator de amortecimento, faça uma análise da dinâmica do sistema de controlo em função da frequência natural não amortecida. Suporte as suas conclusões com base em considerações teóricas e em resultados de simulação.

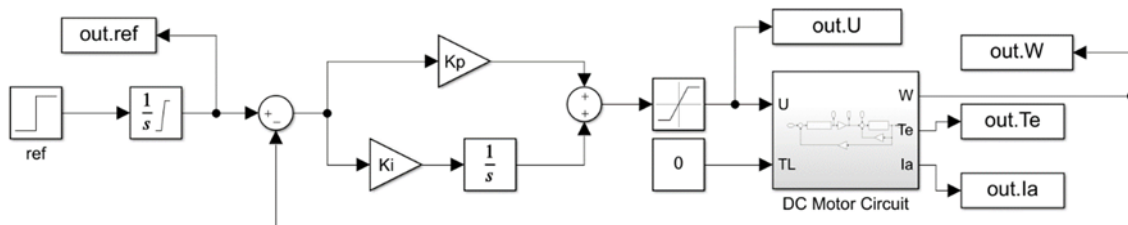


Figura 2: Sistema de controlo PI contínuo.

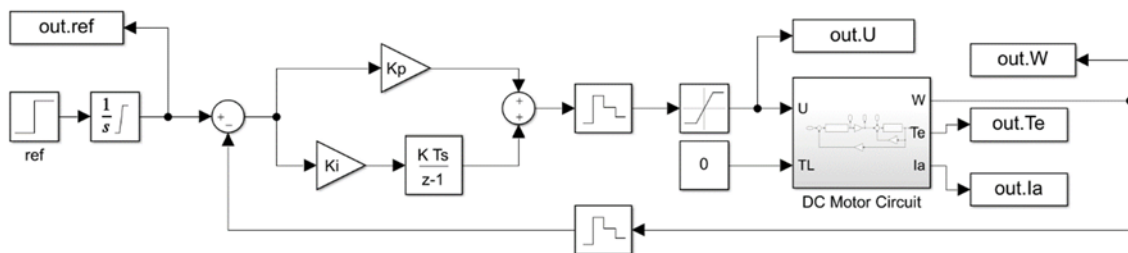


Figura 3: Sistema de controlo PI discreto. (no bloco integrador  $K=1$  e  $T_s \equiv h=0.03 s$ )

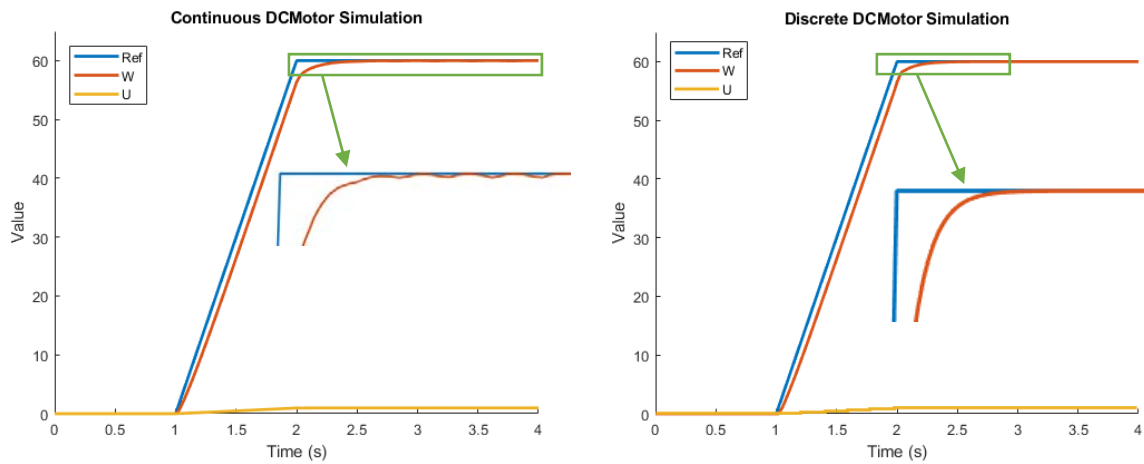


Figura 4: Resposta dos controladores PI para  $K_p = 0.0271$  e  $K_i = 0.2712$ .

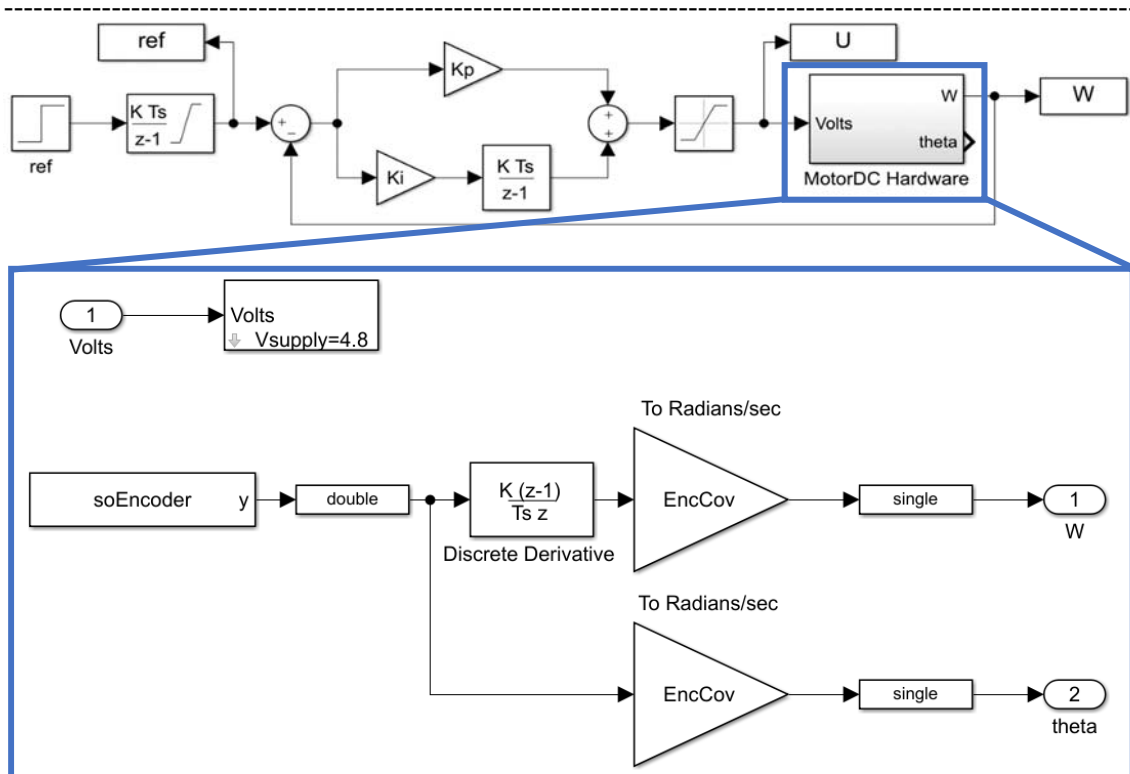


Figura 5: Controlador PI aplicado ao Kit MinSegMotor

## PARTE II: Hardware (Matlab & Simulink)

Ao utilizar o kit MinSegMotor, deve ter em consideração os seguintes aspetos: a tensão de entrada do motor deve estar compreendida entre -4.8V e 4.8V; o encoder acoplado ao veio do motor, cujos dados permitem calcular a velocidade e a posição angular do veio do motor, tem uma quadratura X4 de 1336 (334 pulsos).

- 1) Implemente o subsistema MotorDC Hardware representado na Fig.5. Os blocos Simulink referentes ao hardware MinSegMotor estão disponíveis na biblioteca RASPlib ("RASPlib -> Libraries-> M2V5 Library"). Utilize  $V_{supply}=4.8V$ ;  $EncCov=2*\pi/1336$ .
- 2) Compare o comportamento do MinSegMotor com o obtido na Parte I (simulação relativa ao sistema com controlador PI discreto, Fig.3).

### PARTE III: Controle no Espaço de Estados com e sem ação integral

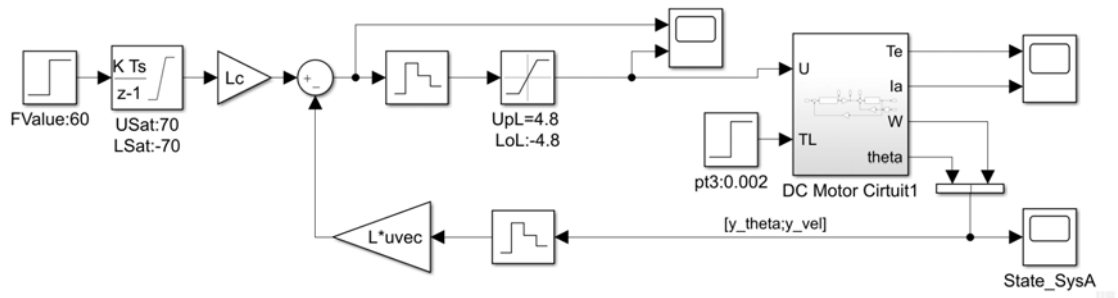


Figura 6: Sistema de controle no Espaço de Estados

1) Projete e simule o sistema de controle no espaço de estados representado na Fig.6. Para dinâmica de regulação desejada considere uma dinâmica criticamente amortecida com frequência natural não amortecida  $\omega_n=20$  rad/s. Considere ganho DC unitário. Aplique duas perturbações: i) no binário de carga (entrada TL), sinal em degrau (valor final: 0.002; step time: 4s); ii) perturbação na entrada (U) em degrau (valor final: 2V; step time: 5s);

a) Apresente a síntese do controlador (valores das variáveis do projeto e script Matlab usado)

b) Apresente a evolução do estado do sistema (para t no intervalo 0 a 6 s) para condições iniciais nulas e um sinal de referência em rampa com início em  $t=1$ s (valor\_final=70) e declive da transição em rampa definido pelo bloco Step da Fig.6 (com valor\_final= 60). Em gráfico separado, apresente a curva do sinal na entrada do bloco Simulink “DC Motor Circuit1”.

c) Mantendo uma dinâmica criticamente amortecida, faça uma análise da dinâmica do sistema função de  $\omega_n$ . Suporte as suas conclusões em análise teórica e empírica (i.e. resultados de simulação).

2) Projete um sistema de controle com ação integral (modelo interno), para especificações de controle e condições de simulação iguais às da alínea anterior (dinâmica criticamente amortecida com frequência natural não amortecida  $\omega_n=20$  rad/s).

a) Apresente o diagrama de blocos Simulink do sistema de controle.

b) Apresente a síntese do controlador (valores das variáveis do projeto e script Matlab usado)

c) Faça uma análise do sistema de controle; apresente a evolução do estado, sinais de comando/controle e de outras grandezas que considere necessárias para a sua análise.

#### **PARTE IV: Controlo no Espaço de Estados, com e sem ação integral aplicado no kit MinSegMotor**

Para um tempo de simulação ( $t_{sim} = 20s$ ), um sinal de referência em rampa com início em  $t=1s$  ( $valor\_final = 50\pi$  e declive da transição em rampa definido pelo bloco Step com  $valor\_final = 60$ ):

- 1) Implemente o sistema de controlo no espaço de estados, sem ação integral, utilizando o modelo “MotorDC Hardware” para que possa ser executado no kit MinSegMotor.
- 2) Insira, no instante  $t = 10s$ , uma perturbação no valor de 2V na entrada do motor.
- 3) Implemente o sistema de controlo no espaço de estados com ação integral, utilizando o modelo “MotorDC Hardware” para que possa ser executado no kit MinSegMotor.
- 4) Insira, no instante  $t = 10s$ , uma perturbação no valor de 2V na entrada do motor.
- 5) Compare e comente os resultados obtidos nas alíneas 2) e 4).

#### **PARTE V: Hardware (Arduino) (Opcional)**

Implemente um controlador PI para o Kit MinSegMotor utilizando apenas o Arduino.

Urbano J. Nunes e Ricardo Pereira

16/03/2022