



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FEMEC 42060

CONTROLE DE SISTEMAS LINEARES

2ª Aula prática - Malha Aberta *vs* Malha Fechada

Prof. Pedro Assis

14 de agosto de 2020

1 Objetivos

Na presente aula prática comparar-se-ão as estruturas de controle em malha aberta e em malha fechada.

2 Introdução

Controlar um sistema pode ser definido como impor um comportamento desejado a um processo. Tipicamente isso envolve guiar a saída para o entorno de uma referência atendendo requisitos de velocidade e precisão. Com esse propósito, é possível adotar estruturas de controle em malha aberta (MA) e malha fechada (MF).

Em MA aplica-se uma entrada na planta que resulta em uma determinada saída desejada. Para que isso funcione adequadamente, a relação entrada-saída deve ser conhecida com precisão, não podendo haver descasamentos de modelo ou perturbações externas. Um diagrama de blocos do controle em MA é mostrado na Figura 1.

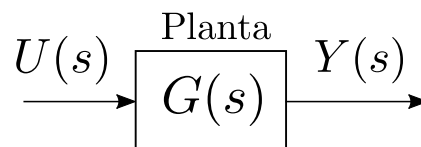


Figura 1: Estrutura de controle em malha aberta.

Algumas vantagens dessa estrutura são simplicidade de construção e manutenção, implementação barata e conveniência em situações nas quais não se é possível medir a saída do processo. Em contrapartida, os efeitos de perturbações ou descasamentos de modelo afetam diretamente a saída da planta. Mais ainda, para manter um desempenho adequado, é possível que uma recalibração frequente seja necessária.

Já em MF (Figura 2) as informações da saída são levadas em consideração no cálculo da entrada da planta (realimentação). Com efeito, tem-se uma maior robustez a perturbações externas e descasamentos de modelo. Por outro lado, o custo de implementação desse controlador é maior, bem como a complexidade de manutenção.

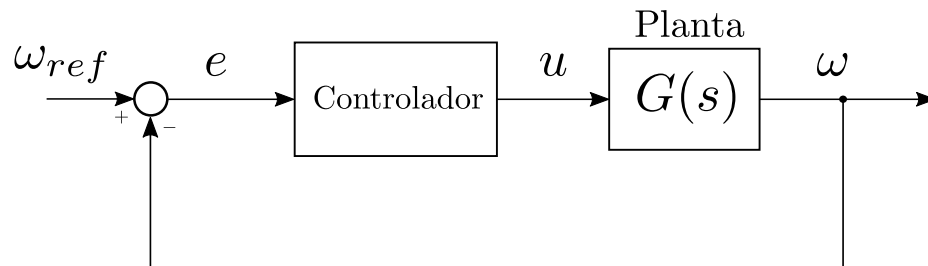


Figura 2: Estrutura de controle em malha fechada.

No que se segue, as estruturas de controle em MA e MF serão comparadas por meio de simulações do comportamento de um motor DC. A Figura 3 mostra uma foto do motor adotado nas aulas práticas.

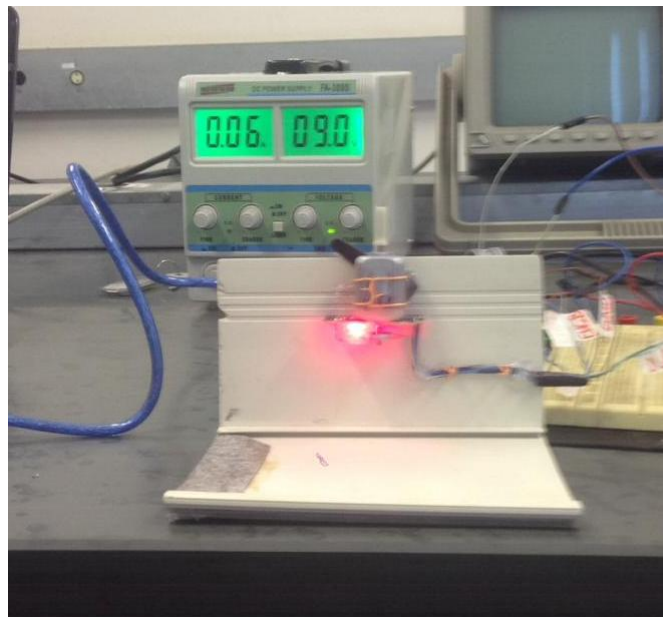


Figura 3: Motor DC utilizado nas aulas práticas do curso de Controle Linear.

A variável de entrada u é o ciclo ativo ou (*duty cycle*) de uma onda quadrada. Essa técnica, conhecida como modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*), permite controlar a tensão média aplicada ao motor. Já a variável de saída pode ser a posição angular θ ou a velocidade angular ω a depender do experimento. Nesse experimento, controlar-se-á ω manipulando-se u .

2.1 Pulse Width Modulation

A modulação por largura de pulso ou PWM (*Pulse Width Modulation*) é um método que permite controlar a energia fornecida a dispositivos elétricos ou codificar mensagens de transmissão. Para isso, manipula-se o tempo em alto, denominado ciclo ativo ou *duty cycle*, ao longo de um período de uma onda retangular. Em termos práticos, controla-se a porcentagem do tempo de nível lógico alto ao longo de um período ou porcentagem de *duty cycle*. Como resultado, a tensão média na saída varia entre 0 V (0 % de *duty cycle*) até 5 V (100 % de *duty cycle*), conforme ilustrado abaixo.

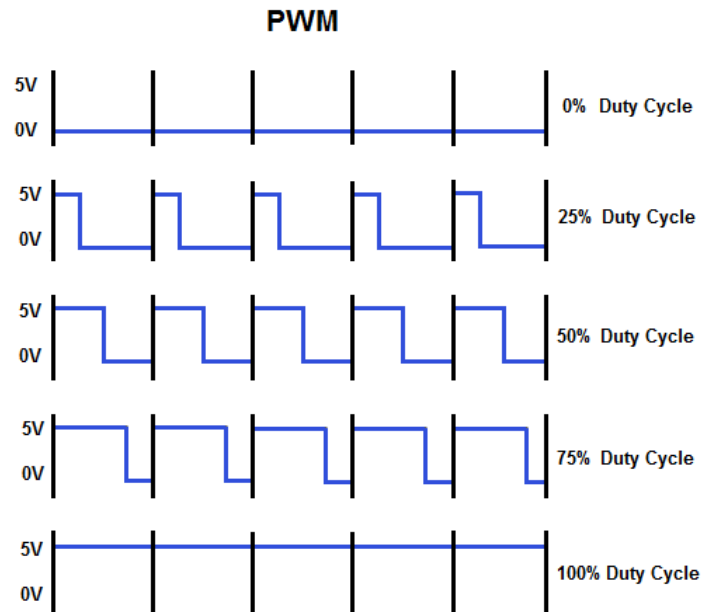


Figura 4: Forma de onda PWM para diferentes valores de *duty cycle*.

A tensão média na saída V_{med} pode ser calculada da seguinte forma:

$$V_{med} = V_{max}DC \quad (1)$$

em que V_{max} é a tensão de alimentação da ponte H e DC é a porcentagem de *duty cycle*.

3 Metodologia

Na sequência os procedimentos para realização das simulações em MA e MF são apresentados.

3.1 Controle de sistemas em malha aberta

Nesse item variar-se-á o ciclo ativo e monitorar-se-á a velocidade do motor. A partir dessas informações um sistema de controle em MA será implementado.

- Copie o arquivo `ensaio_MA.py` fornecido no Google Classroom para uma pasta em seu computador. Esse *script* será a base para a simulação dessa seção
- Modifique a amplitude de entrada ($u[k]$) para preencher a tabela abaixo. Nota: o valor da velocidade da tabela é o valor de regime estacionário (*steady state*), isto é, o valor final médio da velocidade

Tabela 1: Relação entre *duty cycle* (entrada) e velocidade em regime estacionário do motor (saída)

u %	ω_{ss} (rpm)
0	
25	
35	
50	
75	
95	

- Construa um gráfico entre ω e u , e determine a equação que relaciona essas grandezas (equação da reta)
- Utilizando a relação saída-entrada obtida, complete a tabela abaixo

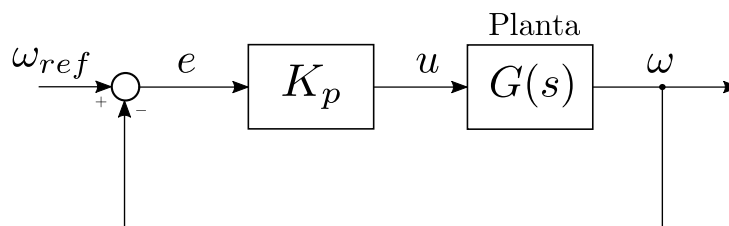
Tabela 2: Desempenho de sistema de controle em MA

Referência (rpm)	u (%)	ω_{ss} (rpm)
1000		
1500		
4000		

- Responda à Seção 1 do relatório

3.2 Sistema malha fechada com um controlador proporcional

- Copie o arquivo `ensaio_MF.py` fornecido no Google Classroom para uma pasta em seu computador. Esse *script* será a base para a simulação dessa seção
- Altere esse código para implementar controlador proporcional em MF conforme ilustrado na figura a seguir. Note que a entrada $u[k]$ depende proporcionalmente do erro $e[k]$ entre a saída $\omega[k]$ e a referência ω_{ref}



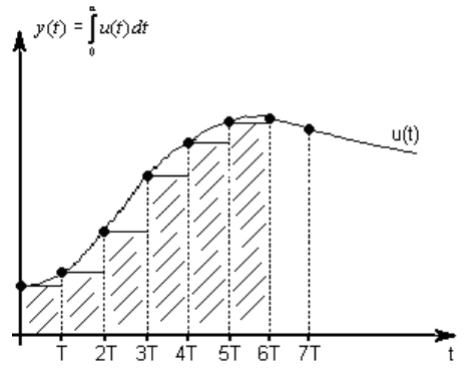
- Verifique o comportamento da planta para um degrau na referência de 1000 rpm após 1 s com $K_p = 0,1$, $K_p = 0,25$, $K_p = 0,5$ e $K_p = 1$. Isto é, salve e analise a figura gerada em cada uma dessas simulações
- Responda aos itens da Seção 2 do relatório

3.3 Exercício

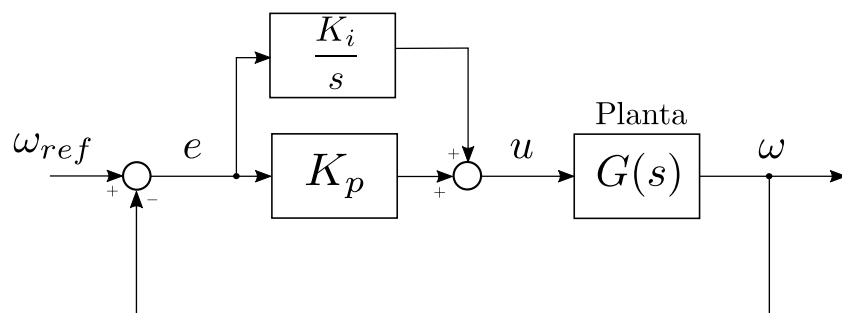
- A integral de um sinal $y(t) = \int_0^\infty u(t)dt$ pode ser realizada a tempo discreto da seguinte forma

$$y[k] = y[k - 1] + Tu[k] \quad (2)$$

em que k indica um instante de tempo discreto e T é o tempo entre k e $k - 1$ (intervalo de amostragem - T_a)



- Considerando essa aproximação, inclua ação integral na malha de controle



- Ajuste $K_p = 0,15$ e $K_i = 0,1$ e aumente o tempo de simulação T_{sim} para 10 s
- Altere a referência para 3000 rpm e verifique a resposta da planta
- Apresente o resultado na Seção 3 do relatório.