Prática 01: Identificação de Processos

20209000617 Francisco do Carmo Amorim - Turma 1 - 2024.1

Seção Teórica

- 1) Sobre o funcionamento do sistema a ser usado nas aulas práticas:
 - a) Qual a função do computador?
 - O computador é a principal via de comando sobre o sistema, onde ocorre a programação, codificação e recebimento de dados do microcontrolador.
 - b) Qual a função do microcontrolador?
 É designado ao microcontrolador o controle sobre o motor por meio do PWM, assim como a leitura do sensor e envio de dados para o computador.
 - c) Qual a função da conexão USB, qual porta a USB emula e qual o seu impacto no sistema de controle?
 - A porta USB serve de canal de comunicação com o microcontrolador, ela emula uma porta serial de comunicação com o PIC.
 - d) Qual a função do software que roda no microcontrolador e do software que roda no PC? Enquanto o software que roda no microcontrolador tem a função de ajustar o PWM conforme o que lhe tiver sido especificado, o software do PC é responsável pela programação primária do microcontrolador e leitura/tratamento de dados recebidos do microcontrolador.

Seção Prática

- 1) Para o processo prático (Motor CC) do laboratório:
 - a) Acionar o motor CC com diferentes valores de degraus para estabelecer os valores máximos e mínimos de entrada (tensão de armadura) e saída (velocidade) da planta. Apresente os dados obtidos na forma numérica e na forma gráfica.
 - O primeiro passo para identificar as tensões mínimas e máximas é estabelecer o critério de seleção para tais:
 - Velocidade mínima: Menor velocidade com que a ventoinha gira;
 - Velocidade máxima: Incrementos adicionais na tensão de entrada não provocam mudanças significativas na velocidade da ventoinha, considerando flutuações na leitura.

Para tanto, foram testados valores de PWM na escala de 0-100% em incrementos de 10%. Com base nas atribuições anteriores, iremos aplicamos o código Q1a para obtenção dos dados e após isso aplicamos o código Q2_experimental para tratamento dos dados, as tabelas e gráficos são mostrados abaixo.

Entrada	Saída
(PWM)	(rps)
ω_0	0
ω_{10}	0
ω_{20}	34,33
ω_{30}	43,32
ω_{40}	54,11
ω_{50}	63,65
ω_{60}	73,18
ω_{70}	79,66
ω_{80}	88,00
ω_{90}	92,36
ω_{100}	97,11

Tabela 1 – Relação PWM aplicado e velocidade de saída em malha aberta.

- b) Determinar, para 80% da variável de entrada (PWM):
 - i) tempo de resposta do sistema;
 - ii) constante de tempo;
 - iii) tempo de acomodação (se houver);
 - iv) sobressinal máximo (se houver);
 - v) ganho estático;
 - vi) período de amostragem adequado.

Iremos primeiramente definir as variáveis pedidas com base nos dados que podemos obter experimentalmente:

- Tempo de resposta do sistema: Período de tempo para que o sistema alcance pela primeira vez o valor final (antes do *overshoot*), no caso de sistemas discretos podemos recorrer a uma interpolação linear caso nossos dados contemplem dois pontos onde, por um lado está abaixo do valor final, e de outro acima.
- Constante de tempo (τ): Para um sistema de 1 ordem corresponde ao tempo necessário para chegar em 63,9% do valor final.
- Tempo de acomodação (t_s): Usando o critério de 2%, o tempo de acomodação refere-se ao tempo necessário para chegar a um erro de saída menor do que 2% do valor final;
- Sobressinal máximo (M_p) : Calculando em termos relativos (%), podemos tomar o valor máximo de saída menos o valor final de saída e dividir pelo valor final e por fim multiplicar por 100%;
- Ganho estático (*K*): Indica a relação valor final/entrada do sistema;
- Período de amostragem $t_{sampling}$: O espaçamento de tempo para coleta de dados, usaremos a condição:

$$\frac{\tau}{10} < t_{sampling} < \frac{\tau}{5}$$
.

Parâmetro	Valor
t_{resp}	1,8 <i>seg</i>
τ	0,7 <i>seg</i>
$t_{\scriptscriptstyle S}$	1,5 <i>seg</i>
M_p	8,66%
K	1,1
$t_{sampling}$	0,1

Tabela 2 - Parâmetros para sistema em 80% PWM

A saída gráfica é mostrada a seguir, porém recomendamos uma olhada no Apêndice 1 onde há outros gráficos para o PWM 80%.

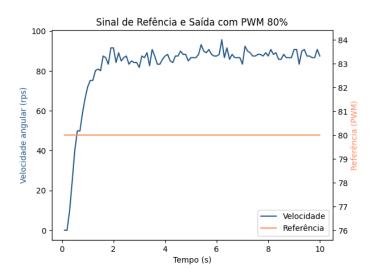


Figura 1 - Sinal de entrada e velocidade de saída para PWM em 80%.

- 2) Determinar experimentalmente funções de transferências de 1ª ordem em s e z para o processo, Motor CC em malha aberta, utilizando o método de resposta ao degrau, para diferentes regiões de operação. Para isto:
 - a) Determine uma Função de Transferência $\tilde{G}(s)$ e $\tilde{G}(z)$ para o motor funcionando em cada uma das seguintes regiões: a 20%, 30%, 60% e 90% de PWM.

Uma função de transferência de primeira ordem considerando o tempo de atraso (*dead time*) é dada por:

$$G(s) = \frac{K * e^{-T_d}}{\tau s + 1}$$

Onde τ é a constante de tempo do sistema e K é o ganho estático, para o tempo de atraso foi feita análise visual sobre os dados obtidos para verificar quando ocorreu a primeira reação do sistema. As tabelas de dados são apresentadas a seguir, o código usado para obtenção de dados é descrito em Q2, enquanto o usado para análise de dados constitui o mesmo Q2_experimental apresentado no item a) da questão anterior.

	K	τ	T_d
ω_{20}	1,71	1,1	0,2
ω_{30}	1,44	0,9	0,1
ω_{60}	1,22	0,8	0,1
ω_{90}	1,03	0,6	0

Tabela 3 – Parâmetros para modelagem de função.

Dessa forma, a partir dos dados obtidos na tabela 3, podemos reescrever a função de transferência de malha aberta no domínio *s* estimada é dada por:

Para discretiza-la e chegar no domínio Z podemos empregar a função c2d(G, Ts) do próprio MATLAB, onde G é a função no domínio *s* que desejamos representar no domínio z e Ts é o tempo de amostragem, ou podemos recorrer a tabelas de transformadas, de qualquer forma, a função de transferência de malha aberta no domínio z estimada é dada por:

	Contínua	Discreta
ω_{20}	1,408	0,1217
ω_{30}	$ \begin{array}{r} 1.1 * s + 1 \\ 1.303 \end{array} $	z - 0.9131 0.137
ω_{60}	$0.9 * s + 1 \\ 1,104$	z - 0.8948 0.1297
ω_{90}	0.8 * s + 1 1.03	$\overline{z - 0,8825}$ $0,1581$
	0.6 * s + 1	z - 0.8465

Tabela 4 – Funções de transferência contínua e discreta.

b) Apresentar na forma gráfica as saídas reais e estimadas, assim como os erros de modelagem, ao aplicar os 4 patamares de degrau definidos.

Para uma experiência mais rica, optamos por incluir as seguintes saídas gráficas:

- Velocidade de saída para cada PWM usando um modelo contínuo;
- Velocidade de saída para cada PWM usando um modelo discreto;
- Erro de saída entre saída experimental e modelo contínuo (para cada PWM);
- Erro de saída entre saída experimental e modelo discreto (para cada PWM);
- Variação de saída entre modelo contínuo e discreto (para cada PWM).

Como temos 4 patamares de pwm, isso implica um total de 20 gráficos, o que se torna muito longo para uma discussão qualitativa deste item, visando contemplar a base teórica sem perder uma guia visual, iremos examinar para o caso de PWM 60%, e convidamos para uma leitura holística de todas as saídas a partir da seção 2 do Apêndice 1, o código para gera-las é apresentado no arquivo Q2.

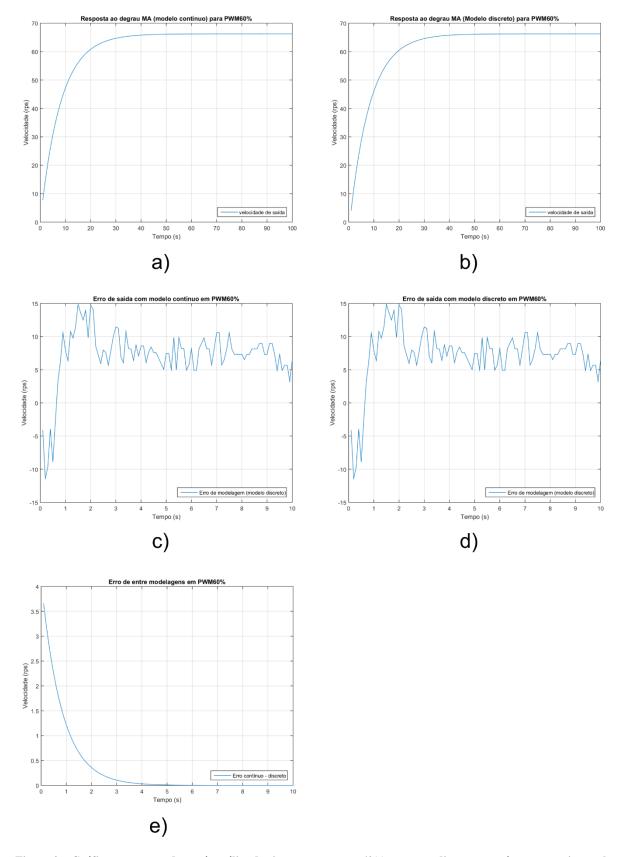


Figura 2 — Gráficos correspondentes à análise do sistema com pwm 60% em casos discreto, contínuo e experimental.

a) Resposta ao degrau em modelo contínuo. b) Resposta ao degrau em modelo discreto. c) Erro de saída em modelo contínuo. d) Erro de saída em modelo discreto. e) Variação entre saída entre modelos.

Conferindo as Fig.2a) e Fig.2b) verificamos que há uma acomodação no valor final para ambos os modelos, além disso se plotarmos os erros entre modelo e verificação experimental, Fig.2c) e Fig.2d), iremos encontrar discrepâncias que revelam como o erro pode influir nos valores e que mostra como uma situação prática precisa de tolerância funcional como mecanismo de prevenção de falhas ou mal funcionamento. Por fim, na Fig.2e) há uma visão sobre o erro entre as modelagens contínua e discreta que busca retratar o caráter discrepante de início, porém de convergência ao longo do tempo.

c) Faça suas observações sobre a não linearidade do processo, considerando o conjunto de parâmetros de constante de tempo e ganho. Apresente um gráfico para cada parâmetro (ganho e constante de tempo) em função do sinal de PWM (20%, 30%, 60% e 90%).

Os gráficos pedidos foram organizados em dois gráficos separados, um para o ganho e outro para a constante de tempo, o código utilizado para confecção pode ser conferido em Q2_experimental.

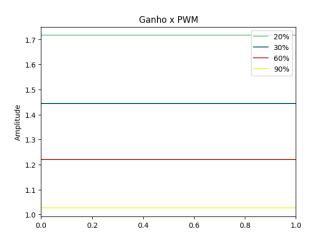


Figura 3 - Ganho vs PWM, para diferentes entradas.

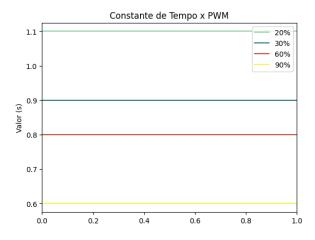


Figura 4 – Constante de tempo vs PWM, para diferentes entradas.

Pelos gráficos é possível perceber que ambos parâmetros são dependentes da velocidade imposta, além disso, convém mencionar que o espaçamento entre eles revela uma tendência não linear.

- 3) Fechar a malha do motor:
 - a) Fazer suas observações a respeito da estabilidade do sistema em malha fechada a partir da resposta ao degrau de referência igual a $\omega_{90}(t)$ rps (90% da velocidade máxima) e calcular os polos de sistema em malha fechada em z.

Os polos em malha fechada podem ser calculados pela seguinte expressão:

$$s_{1,2} = -\xi * \omega_n \pm j * \omega_n * \sqrt{1 - \xi^2}$$

Em Z, fica:

$$z = e^{sT} = e^{-\xi * \omega_n * T} \angle (\pm \omega_n * \sqrt{1 - \xi^2})$$

Dessa forma, a partir do código Q3a obtivemos os dados da planta em malha fechada, em seguida, usamos o código Q3 para fazer análise de dados e obter os parâmetros ξ e ω_n para todos as entradas listadas no item b, no que concerne ao do item a obtivemos $\xi = 0,4778$ e $\omega_n = 13,9518 \ rad/s$. Logo:

$$z_1 = 0.5134 \angle 70.22^{\circ}$$

 $z_2 = 0.5134 \angle -70.22^{\circ}$

Como temos |z| < 1 então o sistema está contido dentro da circunferência unitária e portanto é estável.

b) Para entradas degraus de ω_{20} , ω_{30} , ω_{60} e ω_{90} (rps) em malha fechada, determine o erro de regime, o tempo de subida e o sobressinal máximo (se houver). Apresente seus resultados nas formas gráficas e tabular.

Usamos o código Q3 para fazer a análise de todas os parâmetros pedidos para cada entrada, lembramos ainda que além das definições apresentadas na 1) questão, vale apresentar o tempo de subida que pode ser definido como o tempo que se leva para sair de 10% para 90% do valor de regime (nas referências podem ser consultadas fórmulas fechadas para sistemas contínuos) os resultados são mostrados abaixo.

	Erro de regime (%)	Sobressinal máx. (%)	Tempo de subida (s)
ω_{20}	35,85	4,73	0,51
ω_{30}	36,08	3,03	0,67
ω_{60}	41,11	6,27	0,51
ω_{90}	43,65	5,52	0,32

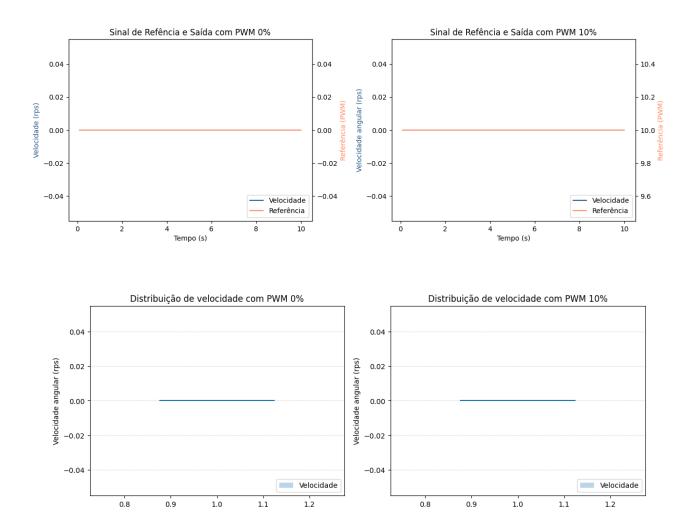
Tabela 4 – Parâmetros de sistema em malha fechada para quatro patamares de pwm.

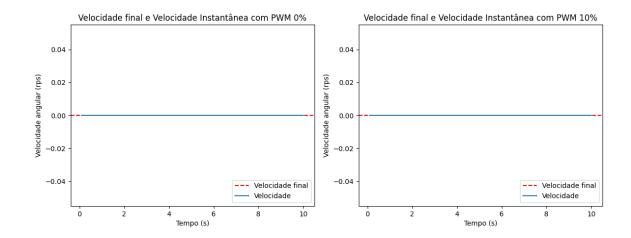
Apêndice 1

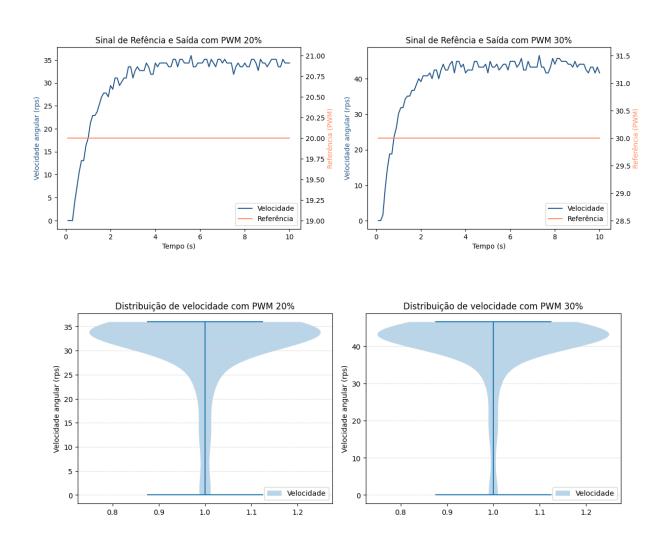
Seção 1:

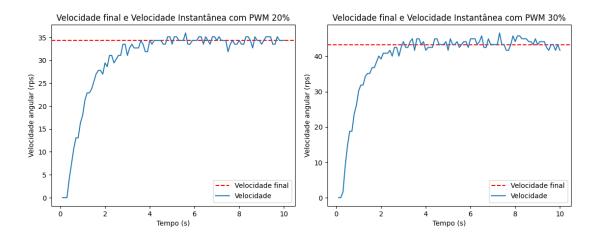
A seguir são apresentadas os gráficos concernentes à questão 1 do texto (e também diz respeito à questão 2b) uma vez que contém os valores reais das saídas pedidas). São estruturados da seguinte forma:

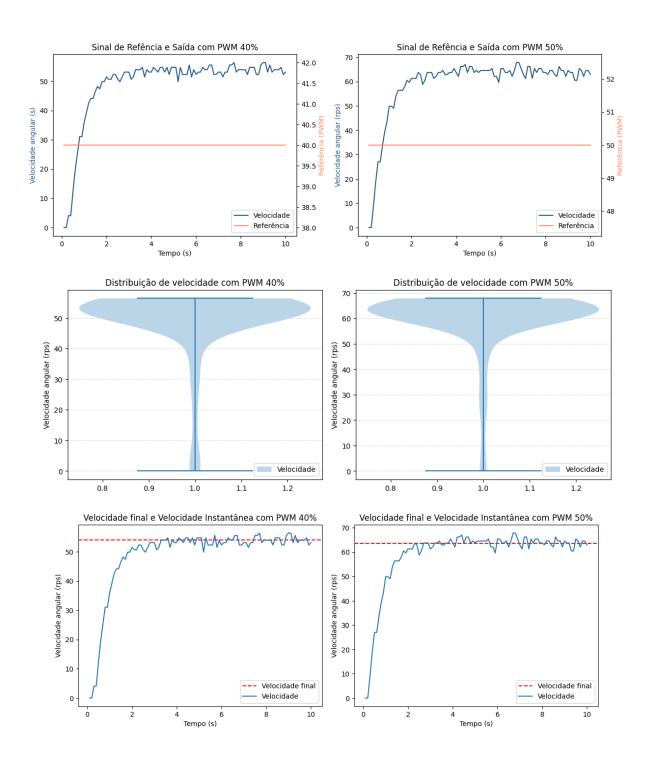
- Gráficos pareados de forma que uma comparação pode ser estabelecida;
- Incluem uma comparação do sinal de referência e saída;
- Incluem um gráfico de violino para entender a distribuição de velocidades;
- Incluem uma comparação entre valor instantâneo da velocidade e valor final.

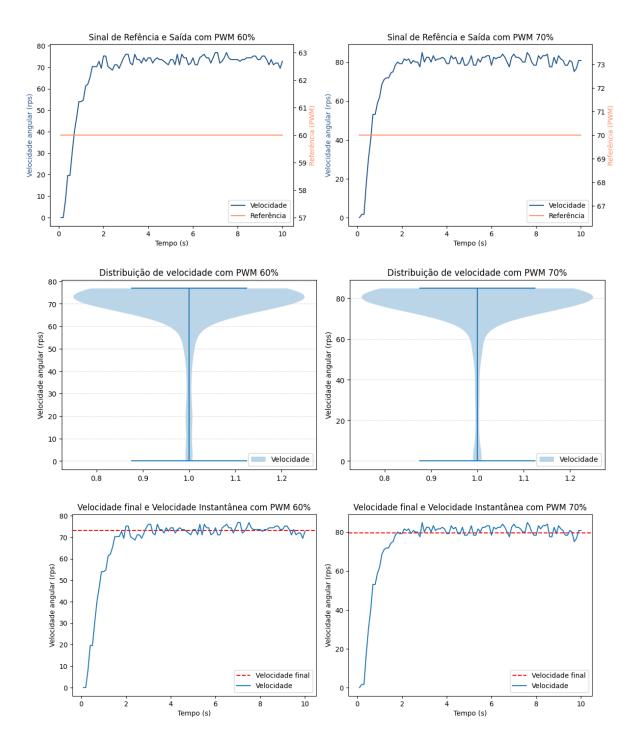


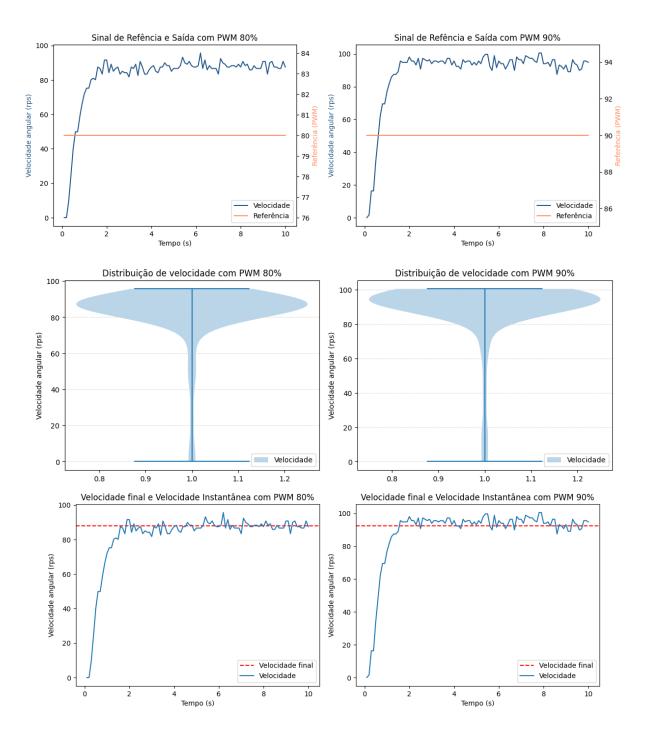


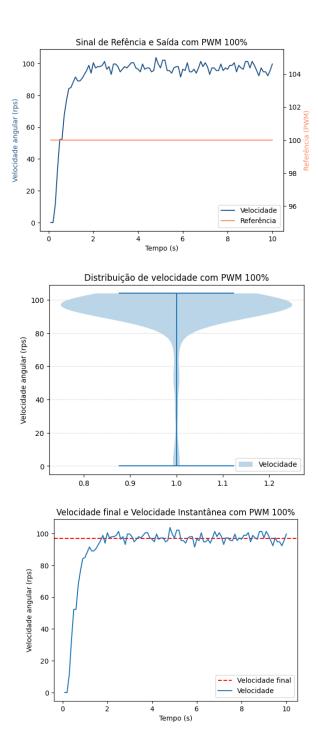






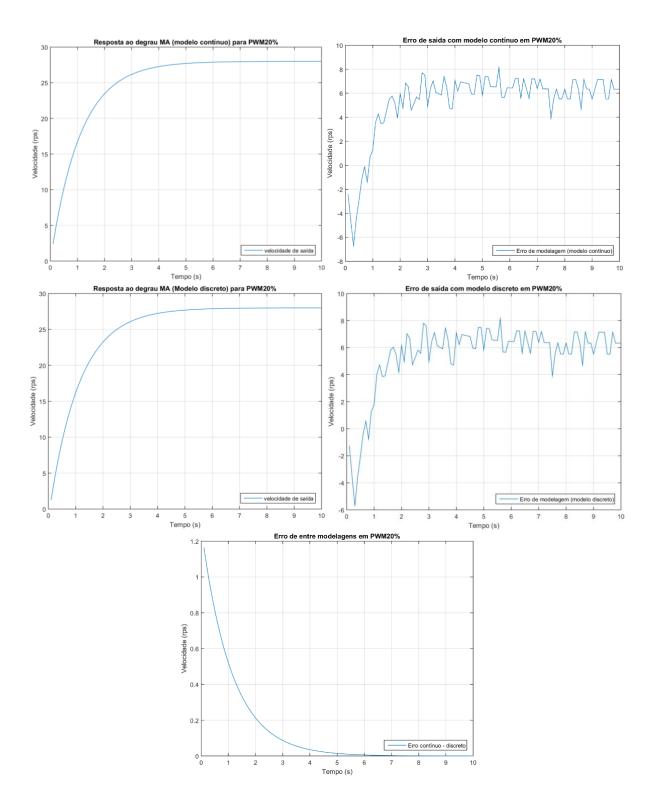


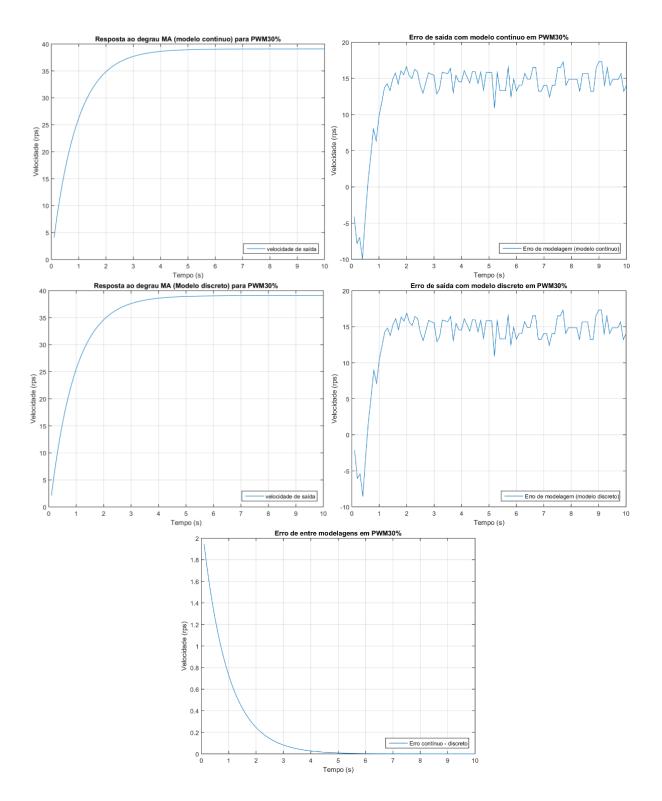


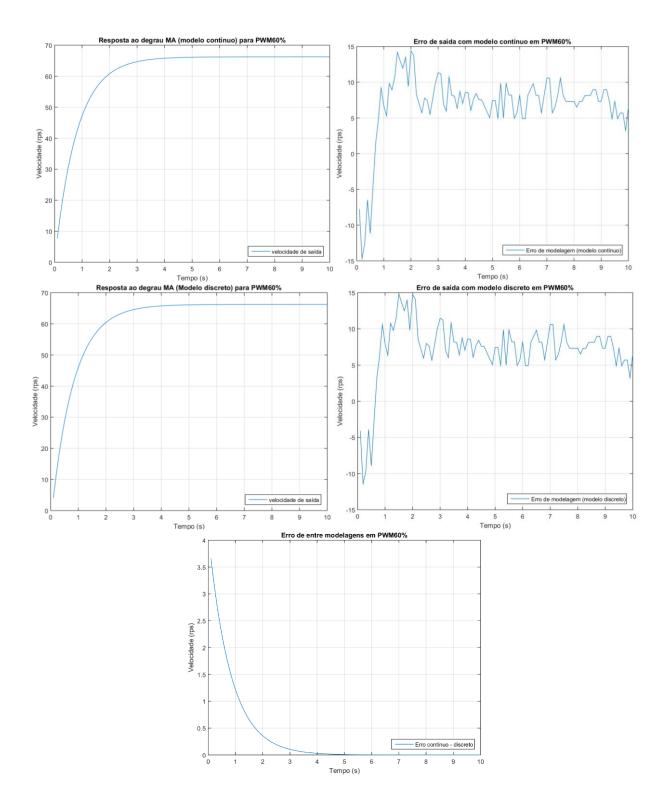


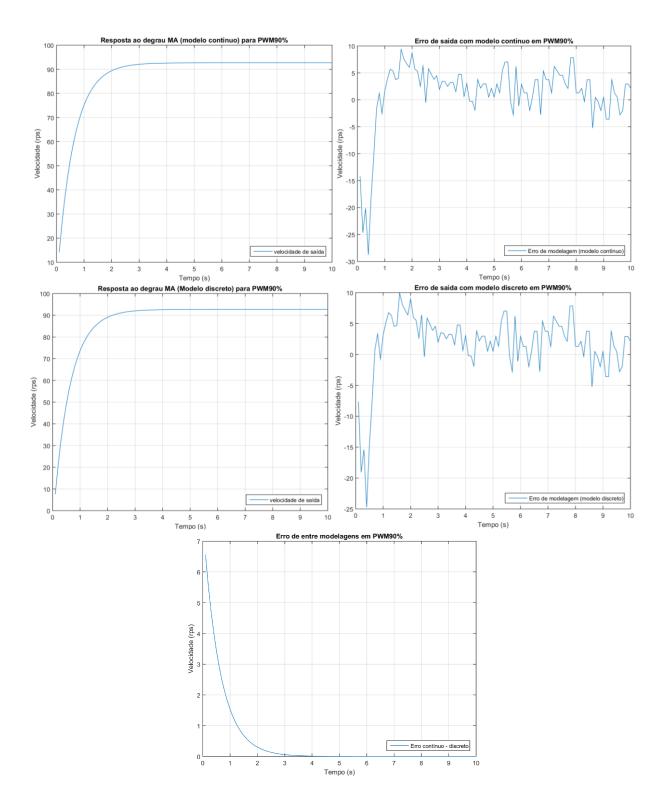
Seção 2:

Nesta seção será apresentado os gráficos competentes à questão 2 (e que não foram apresentados anteriormente) do texto. As imagens a seguir representam o processo em malha aberta para os valores de pwm determinados, em cada um há uma descrição do tipo de modelo (contínuo/discreto) e também dos erros entre modelos.



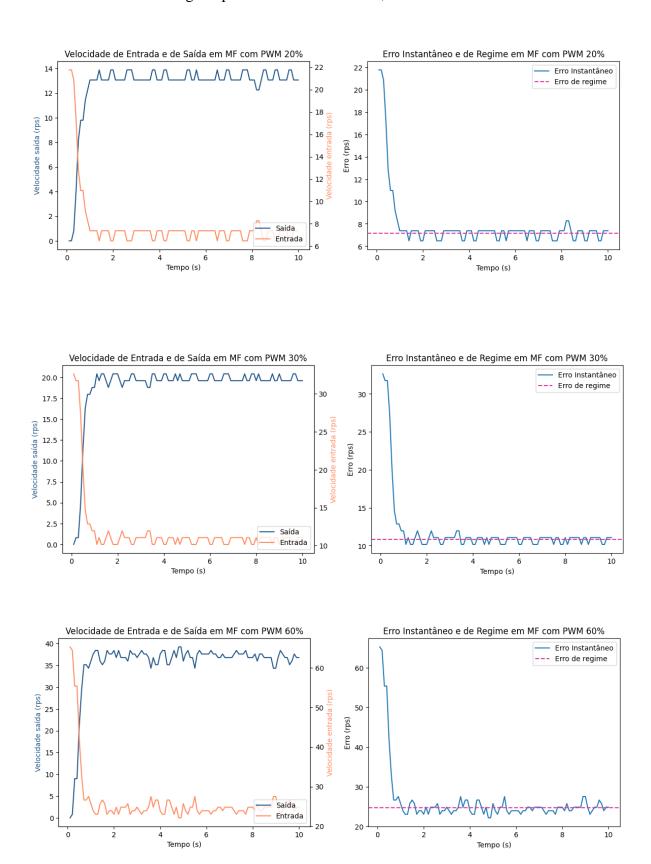


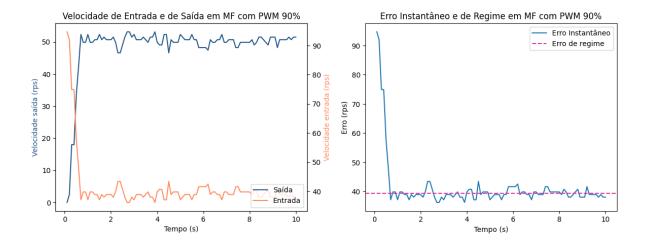




Seção 3:

Aqui serão apresentados os gráficos referentes à questão 3, onde temos a malha fechada e diferentes valores de entrada aplicados na planta. São comparados lado a lado um gráfico de velocidade de entrada/saída e o gráfico do erro instantâneo/de regime para cada valor de PWM, evidenciado no título.





Apêndice 2

A seguir são elencados os códigos referenciados durante o texto.

- 1.a
- 2.a

• 2.b

```
s=tf('s');
data20 = importdata('C:\Users\franc\OneDrive\Documentos\Lab Controle Digital\1
pratica\Fixed\degmotor20.dat');
x20 = data20(:, 1); % for pwm 20
y20 = data20(:, 3);
data40 = importdata('C:\Users\franc\OneDrive\Documentos\Lab Controle Digital\1
pratica\Fixed\degmotor40.dat');
x40 = data40(:, 1); % for pwm 40
y40 = data40(:, 3);
data60 = importdata('C:\Users\franc\OneDrive\Documentos\Lab Controle Digital\1
pratica\Fixed\degmotor60.dat');
x60 = data60(:, 1); % for pwm 60
y60 = data60(:, 3);
```

```
data90 = importdata('C:\Users\franc\OneDrive\Documentos\Lab Controle Digital\1
pratica\Fixed\degmotor90.dat');
x90 = data90(:, 1); % for pwm 90
y90 = data90(:, 3);
x = \{x20, x40, x60, x90\};
y = \{y20, y40, y60, y90\};
input velocity = [20, 30, 60, 90];
dc gains = [1.71, 1.44, 1.22, 1.03];
time constants = [1.1, 0.9, 0.8, 0.6];
dead times = [0.2, 0.1, 0.1, 0];
tsampling = 0.1
pwm = \{ '20', '30', '60', '90' \};
% Iterate over each pair of time constants and DC gains
for i = 1:numel(time constants)
    % Create a transfer function using the current time constant and DC gain
    Gs(i) = tf(dc gains(i)*exp(-dead times(i)), [time constants(i) 1]);
    Gd(i) = c2d(Gs(i), tsampling);
end
%com os modelos prontos, iremos aplicar um degrau correspondente a cada pwm
% Para o modelo continuo:
 for i = 1:numel(time constants)
     h = figure(i);
     hLine1 = line(nan, nan, 'Color', 'red', 'linewidth', 2);
     plot(input velocity(i) * (step(Gs(i),x{i})));
     title(strcat('Resposta ao degrau MA (modelo contínuo) para PWM ',pwm{i},'%'));
     xlabel('Tempo (s)');
     ylabel('Velocidade (rps)');
     legend('velocidade de saída', 'Location', 'southeast');
     saveas(gcf, strcat('C:\Users\franc\OneDrive\Documentos\Lab Controle Digital\1
pratica\Imagens\2)\modelagens\','Resposta ao degrau MA (modelo contínuo) para PWM
',pwm{i},'%.png'));
      h = figure(i+4);
      hLine1 = line(nan, nan, 'Color', 'red', 'linewidth', 2);
      plot(input velocity(i)*step(d2c(Gd(i), 'tustin'),x{i}));
응
      yd = input velocity(i)*step(Gd(i));
     stem(yd);
     xlabel('Tempo (s)');
      ylabel('Velocidade (rps)');
      legend('velocidade de saída', 'Location', 'southeast');
     title(strcat('Resposta ao degrau MA (Modelo discreto) para PWM ',pwm{i},'%'));
      grid on
      saveas(gcf, strcat('C:\Users\franc\OneDrive\Documentos\Lab Controle Digital\1
pratica\Imagens\2)\modelagens\','Resposta ao degrau MA (modelo discreto) para PWM
',pwm{i},'%.png'));
      h = figure(i+8);
      hLine1 = line(nan, nan, 'Color', 'red', 'linewidth', 2);
      plot(x\{i\}, y\{i\} - input velocity(i)*(step(Gs(i), x\{i\})));
      xlabel('Tempo (s)');
      ylabel('Velocidade (rps)');
      legend('Erro de modelagem (modelo contínuo)', 'Location', 'southeast');
      title(strcat('Erro de saída com modelo contínuo em PWM ', pwm{i}, '%'));
      saveas(gcf, strcat('C:\Users\franc\OneDrive\Documentos\Lab Controle Digital\1
pratica\Imagens\2)\modelagens\','Erro de saída com modelo contínuo em PWM
',pwm{i},'%.png'));
```

```
h = figure(i+12);
      hLine1 = line(nan, nan, 'Color', 'red', 'linewidth', 2);
      plot(x\{i\}, y\{i\} - input velocity(i)*step(d2c(Gd(i), 'tustin'), x\{i\}));
      xlabel('Tempo (s)');
      ylabel('Velocidade (rps)');
      legend('Erro de modelagem (modelo discreto)', 'Location', 'southeast');
      title(strcat('Erro de saída com modelo discreto em PWM ', pwm{i}, '%'));
      saveas(gcf, strcat('C:\Users\franc\OneDrive\Documentos\Lab Controle Digital\1
pratica\Imagens\2)\modelagens\','Erro de saída com modelo discreto em PWM
',pwm{i},'%.png'));
      h = figure(i+16);
      hLine1 = line(nan, nan, 'Color', 'red', 'linewidth', 2);
      plot(x\{i\}, input velocity(i)*(step(Gs(i), x\{i\})) -
input velocity(i)*step(d2c(Gd(i), 'tustin'),x{i}));
      xlabel('Tempo (s)');
      ylabel('Velocidade (rps)');
      legend('Erro contínuo - discreto', 'Location', 'southeast');
      title(strcat('Erro de entre modelagens em PWM ', pwm{i}, '%'));
      grid on
      saveas(gcf, strcat('C:\Users\franc\OneDrive\Documentos\Lab Controle Digital\1
pratica\Imagens\2)\modelagens\','Erro de entre modelagens em PWM ',pwm{i},'%.png'));
```

end