



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
DO SUL

ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

ENG10019 - SISTEMAS DE CONTROLE DIGITAIS

Projeto Final - Área 3

Autor:

Giovani Bernardes Merlin

Matricula:

00262607

10 de Dezembro de 2018

1	Introdução	2
2	Desenvolvimento	3
2.1	Modelagem Analítica da Planta	3
2.2	Identificação por Mínimos Quadrados	4
2.3	Projeto do Controlador via LGR	6
2.4	Simulação com validação	8
2.4.1	Re-Projeto	8
2.4.2	Simulação e Validação C2	8
3	Conclusões	11
4	Referências bibliográficas	11

1 Introdução

Neste presente relatório, será apresentada a identificação e o projeto de um controlador para a planta fornecida no trabalho final da área 3 da disciplina de Sistemas de Controle Digitais com o auxílio de um *Arduino* e o software computacional *Matlab*.

A planta fornecida é um circuito elétrico de terceira ordem, a qual foi identificada através do método de mínimos quadrados via ensaio em malha aberta (MA) e seu controle PID projetado via método do Lugar Geométrico das Raízes (LGR), tal controle foi implementado digitalmente em um arduino, para assim realizar ensaios em malha fechada (MF) para a comparação e validação dos resultados obtidos entre simulações e a saída real.

Tal projeto tem como objetivo utilizar as técnicas desenvolvidas em sala de aula, sendo assim: obter modelo via aquisição de dados da planta, projetar um controlador que garanta seguimento de referência e desempenho satisfatório, e, por fim, a implementação do mesmo.

2 Desenvolvimento

2.1 Modelagem Analítica da Planta

A planta a ser controlada é explicitada na Figura (1) :

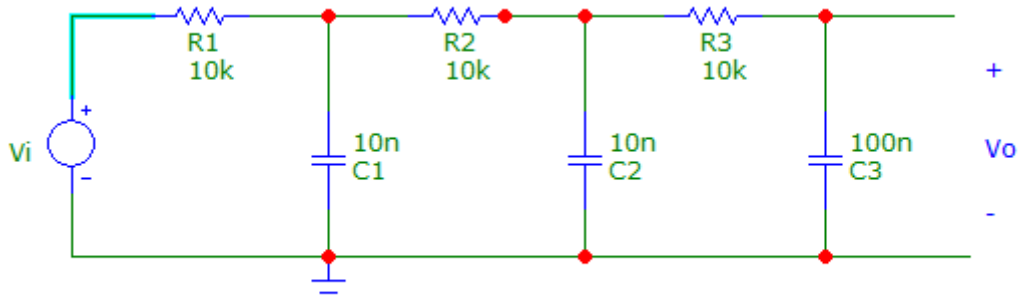


Figura 1: Planta especificada

Através da análise com transformada de Laplace, chega-se na seguinte equação para a saída em relação à entrada:

$$V_o = \frac{V_i}{\alpha} \quad , \quad (1)$$

$$\alpha = s^3(C_1C_2C_3R_1R_2R_3) + s^2(C_1C_2R_1R_2 + C_1C_3R_1R_2 + C_1C_3R_1R_3 + C_2C_3R_1R_3 + C_2C_3R_2R_3) + s(C_1R_1 + C_2R_1 + C_2R_2 + C_3R_1 + C_3R_2 + C_3R_3) + 1$$

Conferindo os componentes em um multímetro, são encontrado os seguintes valores reais para os componentes :

- $R_1 = 9620\Omega$
- $R_2 = 9670\Omega$
- $R_3 = 9710\Omega$
- $C_1 = 9,340nF$
- $C_2 = 79,2nF$
- $C_3 = 79,7nF$

Tal variação entre o valor nominal do componente e seu valor efetivo se dá pelo processo de fabricação. Substituindo tais valores na equação (1), chega-se na seguinte Função de Transferência (Tf) de tempo contínuo :

$$G(s) = \frac{1.8778 \cdot 10^8}{(s + 2.292 \cdot 10^4)(s + 2901)(s + 282,4)} \quad (2)$$

Aplicando o comando *Step* do *Matlab*, percebe-se o mesmo possui tempo de acomodação de $14,3ms$. Para poder se ter uma boa amostragem desse sistema, é necessário ter pelo menos 10 amostras dentro do tempo de acomodação, i.e, $T_s \leq 1,43ms$. Como em malha fechada é esperado ter um tempo de estabilização mais rápido, para amostrar adequadamente, foi escolhido a frequência de amostragem como $2,5kHz$ ($T_s = 0,4ms = 400\mu s$).

Discretizando o sistema (2) com tal taxa de amostragem, chega-se no seguinte sistema de tempo discreto :

$$G_{Teórica}(z) = \frac{0,036842(z + 0,9631)(z + 0,01415)}{(z - 0,8932)(z - 0,3133)(z - 0,0001045)} \quad (3)$$

Vale lembrar que tal análise foi realizada apenas para fins comparativos educacionais, pois com a utilização da identificação por aquisição de dados não é necessário conhecer o sistema (apenas saber a ordem do mesmo).

2.2 Identificação por Mínimos Quadrados

Para a identificação da planta, foi utilizado um script no *Arduino* o qual gera valores aleatórios para a entrada da planta em PWM, e em seguida, amostra a saída da mesma. Tal escolha, de entradas aleatórias, é feita em razão de poder excitar o maior número de frequências possíveis. A realização do ensaio obteve aproximadamente 18000 dados de entrada e saída.

Com o auxílio do *MatLab*, foi implementado a aproximação do sistema pelo método de Mínimos Quadrados, conforme visto em aula, para um sistema de terceira ordem, tal implementação pode ser visualizado no script (1) :

Listing 1: Identificação do sistema

```
phi = [u(3:end-1) u(2:end-2) u(1:end-3)
-y(3:end-1) -y(2:end-2) -y(1:end-3)];
theta = (phi'*phi)\(phi'*y(4:end)) ;
num = [theta(1) theta(2) theta(3)];
den = [1 theta(4) theta(5) theta(6)];
amostragem = 400*10^-6;
w = tf(num,den,amostragem);
G_Identificada = zpk(w);
```

Após a execução do script, foi identificada a seguinte planta :

$$G_{Identificada}(z) = \frac{0,038875(z^2 + 1.078z + 0.3756)}{(z - 0,8997)(z - 0,1616)(z + 0.1386)} \quad (4)$$

Para compararmos os dois modelos, foram realizados ensaios de entradas aleatórias e saltos para o modelo teórico e o estimado, com a saída real da planta nas figura (2) e (3) :

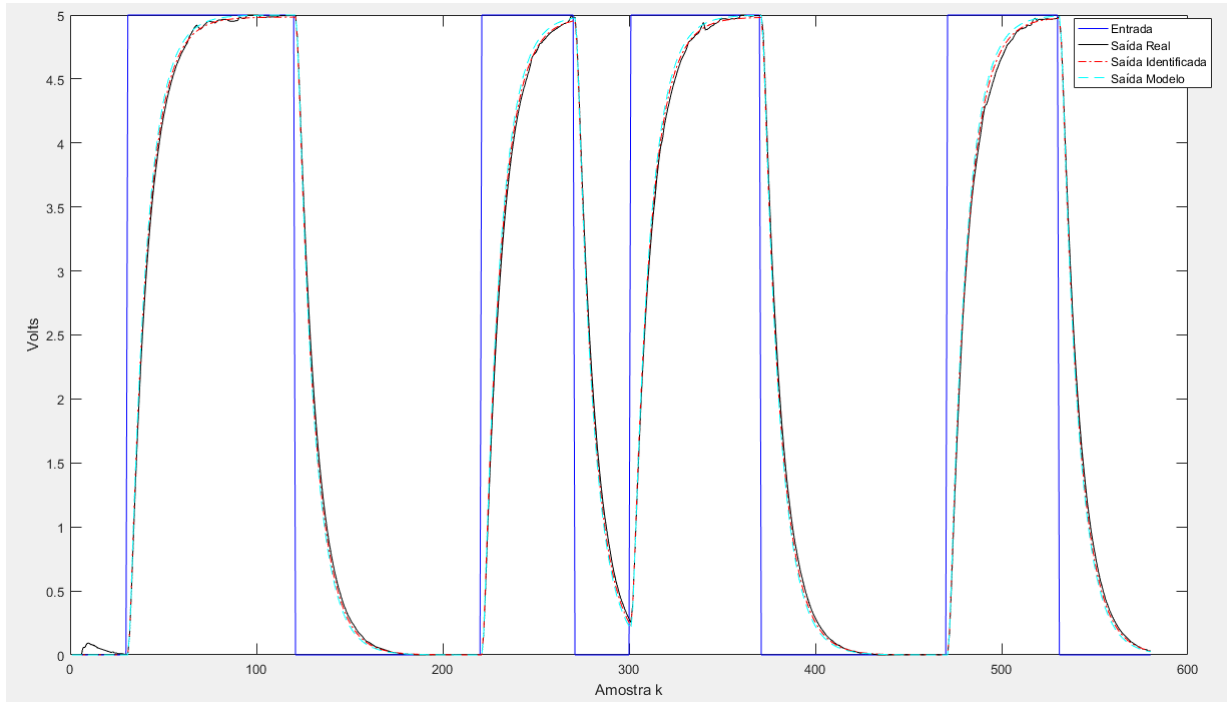


Figura 2: Ensaio ao salto, Fit de 97.58% para a planta identificada e 95.58% para a modelada

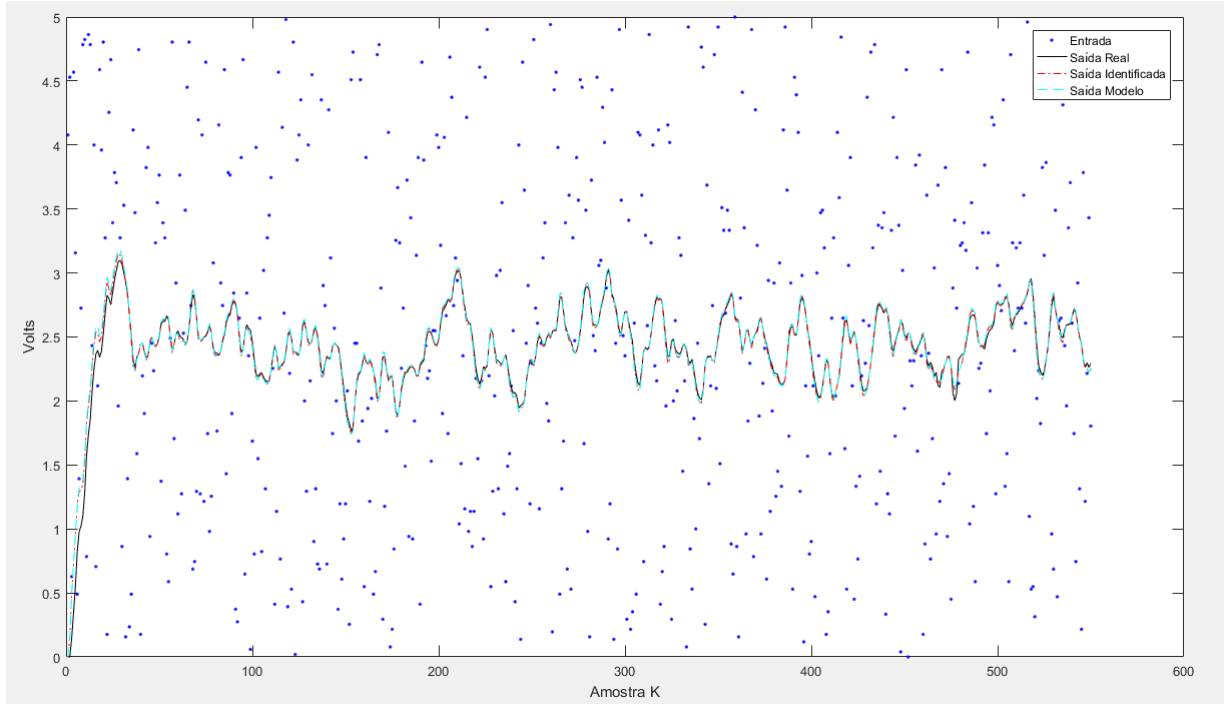


Figura 3: Ensaio aleatório, Fit de 92.72% para a planta identificada e 91.36% para a modelada

Para os dois casos, o *Fit* foi maior para a planta identificada via Mínimos Quadrados, mostrando assim a eficiência do método.

2.3 Projeto do Controlador via LGR

Para poder controlar a planta então identificada, é necessário projetar um controlador PID via método do Lugar das Raízes. Analisando o diagrama de polos e zeros na figura (4), constata-se que é necessário anular o polo mais afastado (em 0,8997) para ter um melhor tempo de acomodação. Analisando as diferentes maneiras de alocar o polo e o zero que resta do controlador, optou-se por alocar o zero à esquerda do polo, sendo o primeiro em -0.4 e o segundo em -0.5. Tal escolha de alocação foi realizada com o objetivo de ter o menor tempo de acomodação, sem overshoot, que não necessite ganho alto e que a variação do ganho não varie bruscamente a posição dos polos. O Lugar Geométrico das Raízes resultante pode ser visualizado na figura (5).

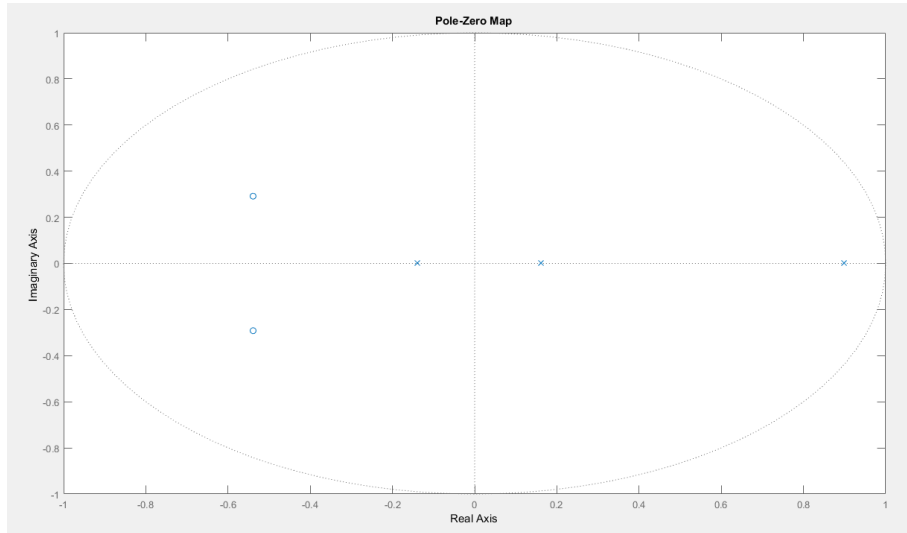


Figura 4: Diagrama de polos e zeros

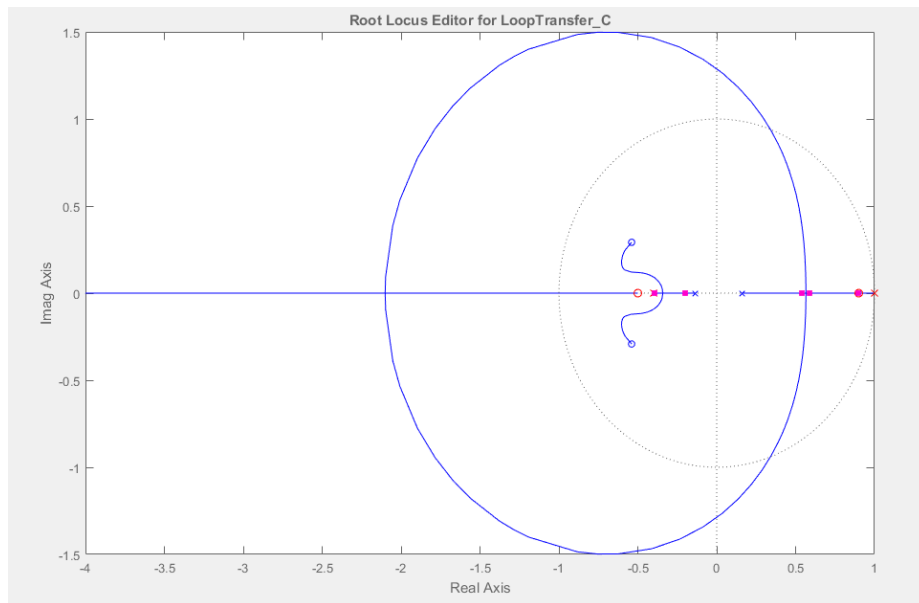


Figura 5: Lugar Geométrico das Raízes

Tal configuração resulta na equação do controlador como sendo :

$$C(z) = \frac{2.2(z - 0.8997)(z + 0.5)}{(z - 1)(z + 0.4)} = \frac{2z^2 - 0.8793z - 0.9897}{z^2 - 0.6z - 0.4} \quad (5)$$

Ou, na forma padrão :

$$C(z) = K_p + \frac{K_i T_s}{z-1} + \frac{\frac{K_d}{T_f}(z-1)}{z-1 + \frac{T_s}{T_f}} = 2.3459 + \frac{0.2364}{z-1} + \frac{-0.1459z + 0.1459}{z+0.4} \quad (6)$$

2.4 Simulação com validação

Implementando a equação do controlador no Arduino como sendo uma equações de diferenças, e realizando a simulação com o ensaio de 1V, foi resultado em uma resposta com overshoot de aproximadamente 3% e tempo de estabilização de aproximadamente 6ms, divergindo consideravelmente do modelo simulado, dado que o mesmo não possuiu overshoot e assim obteve tempo de estabilização de 5ms. Tal divergência provavelmente ocorre por o controlador possuir um ganho relativamente alto, resultando em os polos estarem na iminência de saírem para o plano complexo. Quanto maior o ganho maior será a variação da resposta do sistema real e do sistema identificado, tendo em vista que a localização dos polos e zeros muda consideravelmente de seu lugar original com o aumento do ganho.

2.4.1 Re-Projeto

Para atingir uma resposta com tempo de estabilização menor e com menor overshoot, o controlador foi re-projetado para ter um ganho menor, de 2 em vez de 2.2. A nova equação do controlador é dada como:

$$C(z) = \frac{2(z-0.8997)(z+0.5)}{(z-1)(z+0.4)} = \frac{2z^2 - 0.7994z - 0.8997}{z^2 - 0.6z - 0.4} \quad (7)$$

Ou, na forma padrão :

$$C(z) = K_p + \frac{K_i T_s}{z-1} + \frac{\frac{K_d}{T_f}(z-1)}{z-1 + \frac{T_s}{T_f}} = 2.1326 + \frac{0.2149}{z-1} + \frac{-0.1326z + 0.1326}{z+0.4} \quad (8)$$

2.4.2 Simulação e Validação C2

Implementando o novo controlador no Arduino em forma de equações de diferenças, realizando as simulações e os ensaios para 1V e 2V, são obtidas as respostas exibidas nas figuras (6), (7), (8) e (9).

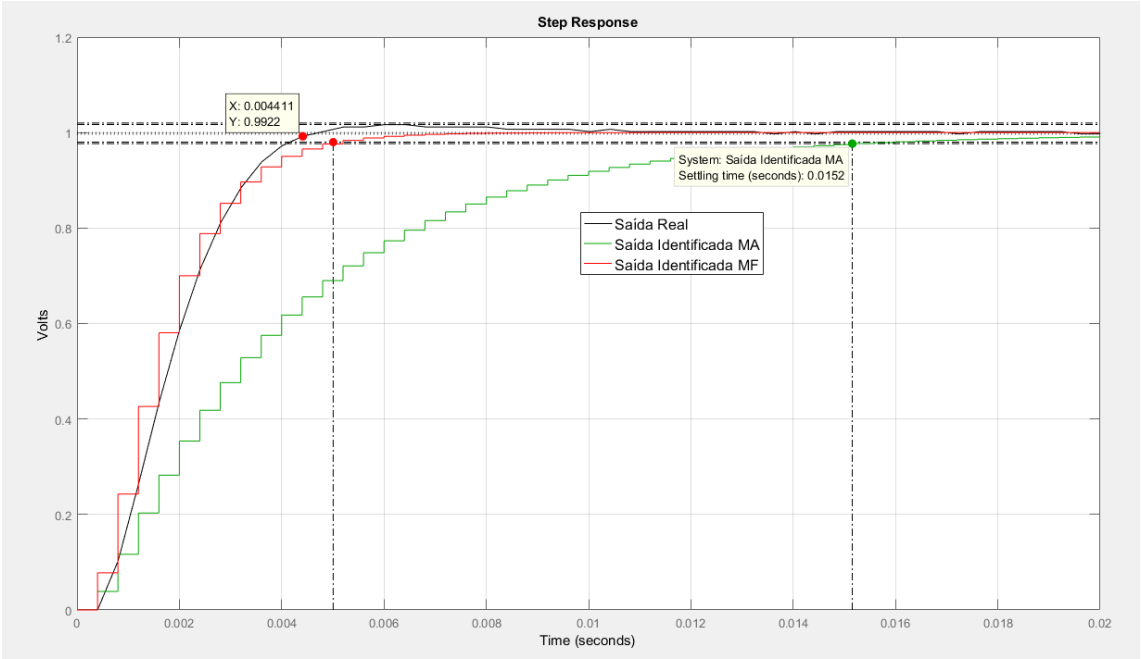


Figura 6: Saida ensaio 1V

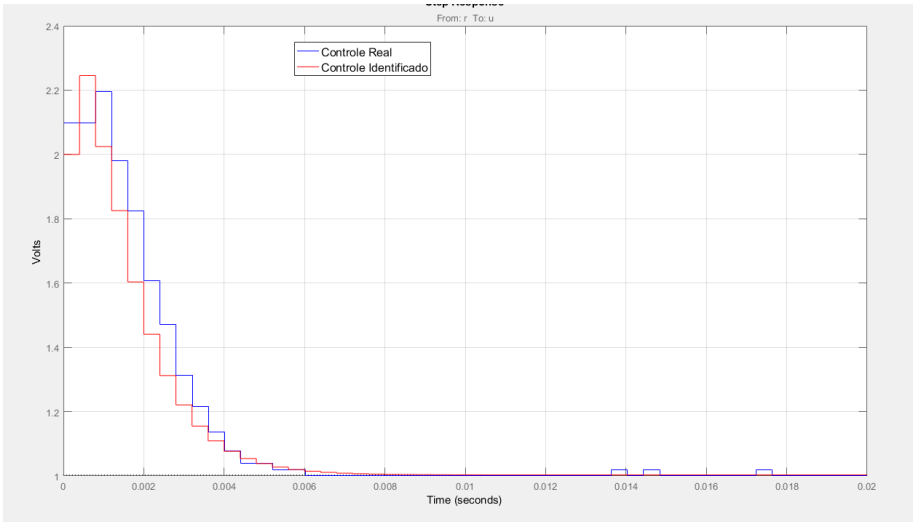


Figura 7: Controle ensaio 1V

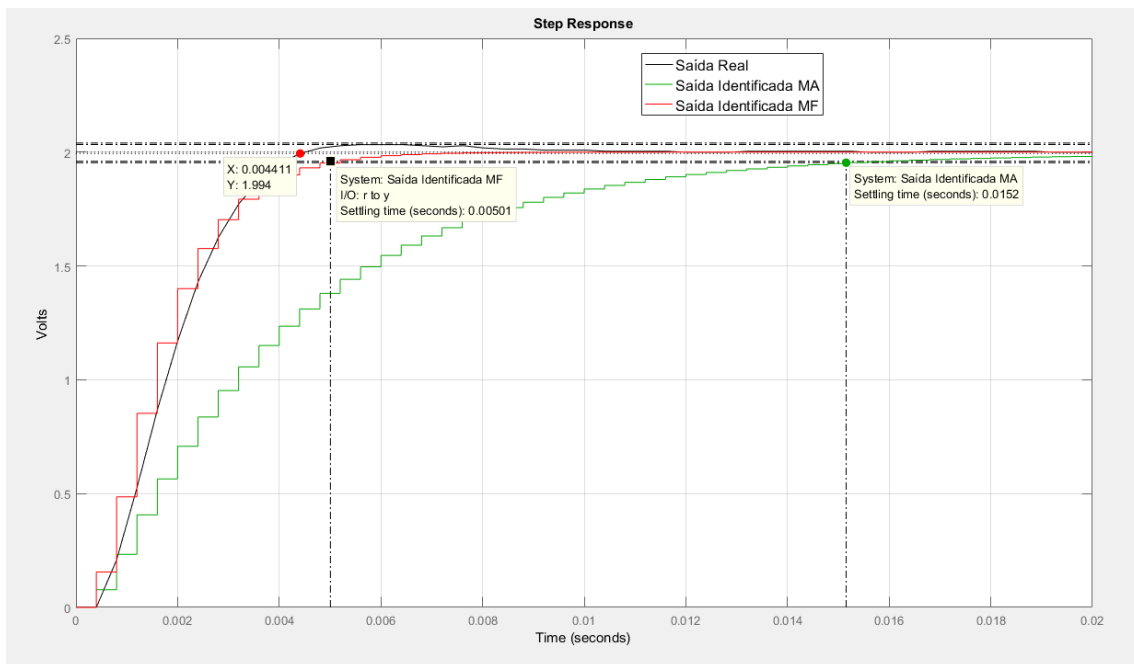


Figura 8: Saida ensaio 2V

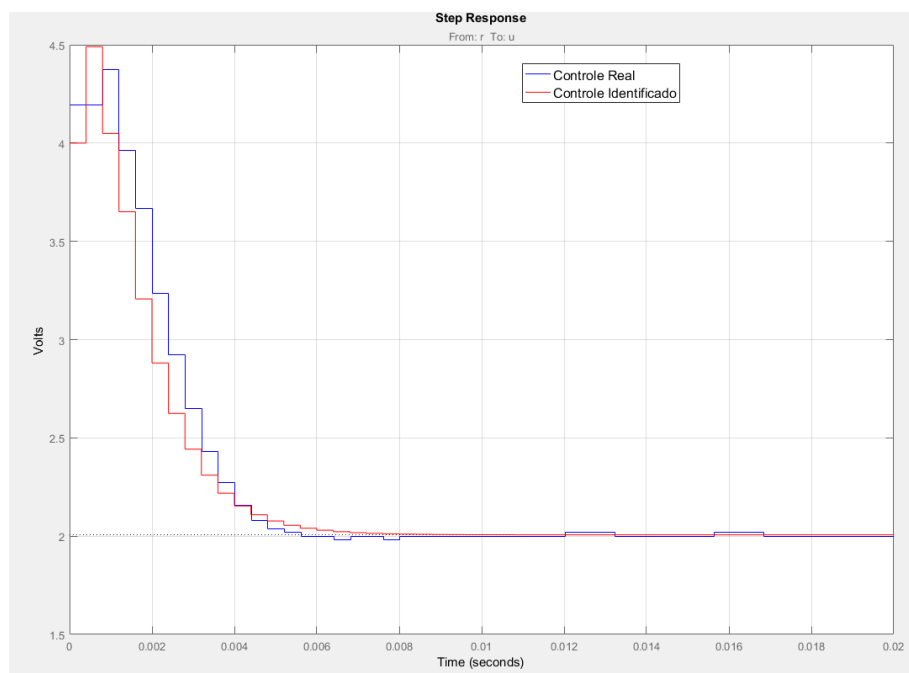


Figura 9: Controle ensaio 2V

Para as duas obteve-se tempo acomodação em MF (malha fechada) de aproxi-

madamente $4.4mS$ para o sistema real e de $5ms$ para o simulado, sendo que em MA (malha aberta) foi de $15.2mS$. Percebe-se que a saída possui um comportamento muito próximo do sistema simulado, apenas com a diferença que ocorre overshoot menor do que 2% no sistema real. Tal overshoot causa um tempo de estabilização menor do que o simulado.

3 Conclusões

O projeto obteve um resultado que pode ser considerado ótimo, em que o tempo de estabilização em MF caiu em cerca de um terço, gerando um overshoot menor do que 2%. Não foram encontrados problemas significativos para a implementação da planta e do controle, apenas necessário buscar informações de programação em Arduino e uso de Timers para a amostragem.

Além disso, foi de alto valor de aprendizado, em que proporcionou ao estudante de Engenharia uma implementação prática de controle, desenvolvida a partir do zero. Tal aprendizado poderá ser aproveitado para qualquer aplicação prática em controle futuramente, conjuntamente com a lição de que para ganhos mais elevados é necessário fazer uma constante validação do modelo.

4 Referências bibliográficas

- BAZANELLA, A., Sistemas de Controle: princípios e métodos de projeto. UFRGS, 2005.