

Grupo 3 - Módulo 1 - Massa Mola

Felipe Nery Barcelos Araújo (2020021190) *
Gustavo Vieira Barbosa (2020021352) *
Matheus Marques Gonçalves de Paula (2020068995) *

* Engenharia de Controle e Automação,
Universidade Federal de Minas Gerais, MG
(e-mails: felipenery@ufmg.br, gustavovbarbosa@ufmg.br,
mmgp@ufmg.br)

Abstract: These instructions give you guidelines for preparing papers for IFAC technical meetings. Please use this document as a template to prepare your manuscript. For submission guidelines, follow instructions on paper submission system as well as the event website.

Keywords: Five to ten keywords, preferably chosen from the IFAC keyword list.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas massa-mola são capazes de representar uma ampla gama de fenômenos físicos e engenharia. De forma a desempenhar um papel fundamental na modelagem desses fenômenos e sistemas mecânicos complexos, tais como: suspensões veiculares, sistemas de suspensão de edifícios, sistemas biomecânicos e muitos outros o sistema massa-mola representa com elevada exatidão. Afinal, com uma modelagem precisa, o sistema é capaz de realizar controle garantindo o desempenho e a estabilidade desejada.

Ao longo desse relatório será visto um estudo focado no controle de um sistema de massa-mola composto por duas massas interconectadas por duas molas, como mostra a figura 1, um problema clássico de controle de sistemas dinâmicos.

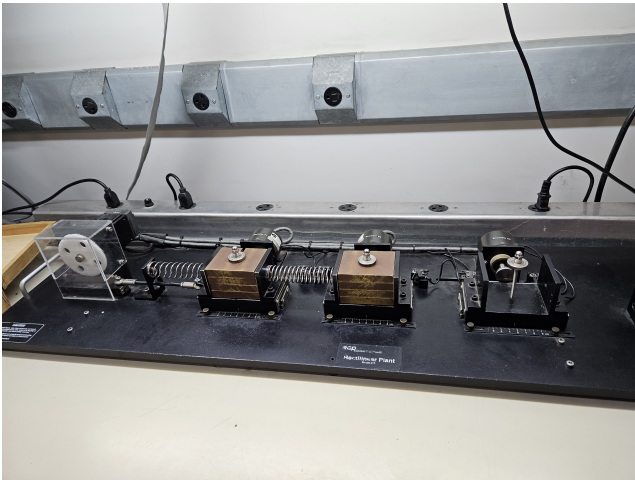


Fig. 1. Figura da planta real estudada, composta por duas molas de diferentes coeficientes e massas de 500 gramas cada. Fonte: Autoral

Com isso, nas seções subsequentes, exploraremos em detalhes a modelagem matemática do sistema massa-mola, bem como o fundamento do controle utilizado e demonstrações práticas.

2. DESCRIÇÃO DA PLANTA E ESPECIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DESEJADO

Next we see a few subsections.

2.1 Especificação do desempenho desejado

O controle a ser realizado visa, inicialmente, controlar a posição do segundo carrinho bem como tornar o sistema estável, erro nulo para entrada de degrau, tempo de acomodação menor do que 4 segundos e sobressinal até 20%.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA E VALIDAÇÃO DO MODELO

3.1 Modelagem matemática

Após a definição do sistema em espaço de estados, deve-se encontrar os parâmetros k_1 , k_2 , c_1 , c_2 , m_1 e m_2 . Para isso, analisa-se um sistema simples com um carro e uma mola, cuja equação característica é representada por:

$$s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m} = 0 \quad (1)$$

Esse é um sistema de segunda ordem, que é representado tipicamente por:

$$s^2 + 2\omega_n\zeta s + \omega_n^2 = 0 \quad (2)$$

onde a frequência natural ω_n e o amortecimento ζ podem ser encontrados facilmente através de respostas ao degrau. Comparando os termos de ambas equações, tem-se:

$$\frac{c}{m} = 2\omega_n\zeta \quad (3)$$

$$\frac{k}{m} = \omega_n^2 \quad (4)$$

Sendo assim, tem-se duas equações e três variáveis. Portanto, foram realizados quatro testes com duas diferentes partes da planta. O primeiro teste consistiu na aplicação de um degrau de 2,5 cm no sistema com a mola k_1 e o

carro m_1 com adição de 2 kg de massa. O segundo teste consistiu na aplicação desse mesmo degrau, mas sem massa adicional no carro. Dessa forma, na saídas de ambos os testes, verifica-se o amortecimento e a frequência natural, seguindo as equações 3 e 4. Tem-se, portanto, o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \frac{c_1}{m_1 + 2} = 2\omega_{n1}\zeta_1 \\ \frac{m_1 + 2}{k_1} = \omega_{n1}^2 \\ \frac{k_1}{m_1} = \omega_{n2}^2 \end{cases} \quad (5)$$

Calcula-se, a frequência natural e o amortecimento dos testes 1 e 2 utilizando analisando a resposta ao degrau, juntamente da função *findpeaks* do MATLAB. Para o amortecimento, as amplitudes dos picos caem exponencialmente através da relação $e^{\omega_n \zeta}$. Sendo assim, os valores dessas foram submetidos a uma linearização através de um logaritmo natural. O resultado da linearização é uma função de primeira ordem, onde o coeficiente angular é igual a $\omega_n \zeta$. Os gráficos das respostas ao degrau dos testes 1 e 2 estão presentes nas figuras 2 e 3. Os gráficos das amplitudes linearizadas sobre o tempo estão presentes nas figuras 4 e 5.

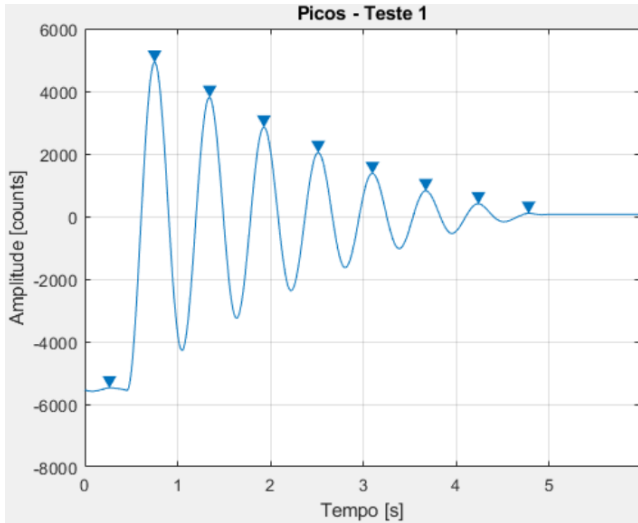


Fig. 2. Resposta ao degrau do teste 1. Fonte: Autoral.

Portanto, através dos gráficos da figura 2, com ajuda do MATLAB, foi obtido uma frequência natural de:

$$\omega_{n1} = 10,5956 \quad (6)$$

O resultado da regressão linear da figura 4 permite dizer que:

$$0,6032 = \omega_{n1}\zeta_1 \rightarrow \zeta_1 = \frac{0,6032}{\omega_{n1}} = 0,0569 \quad (7)$$

O mesmo procedimento foi feito com os resultados do teste 2, presentes nas figuras 3 e 5.

$$\omega_{n2} = 19,6965 \quad (8)$$

$$1,492 = \omega_{n2}\zeta_2 \rightarrow \zeta_2 = \frac{1,492}{\omega_{n2}} = 0,0757 \quad (9)$$

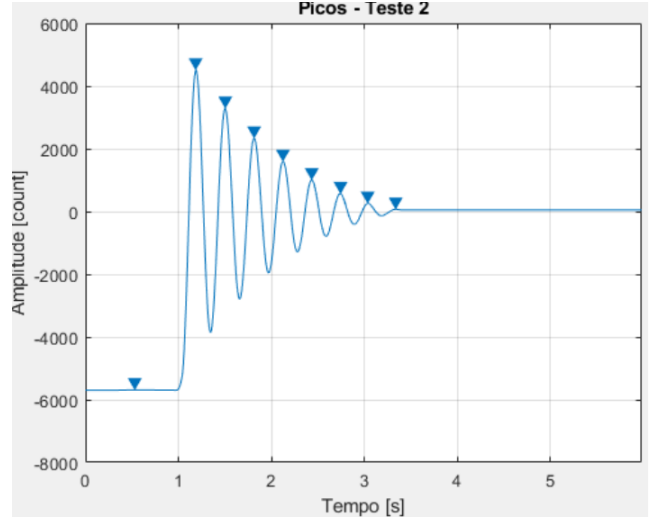


Fig. 3. Resposta ao degrau do teste 2. Fonte: Autoral.

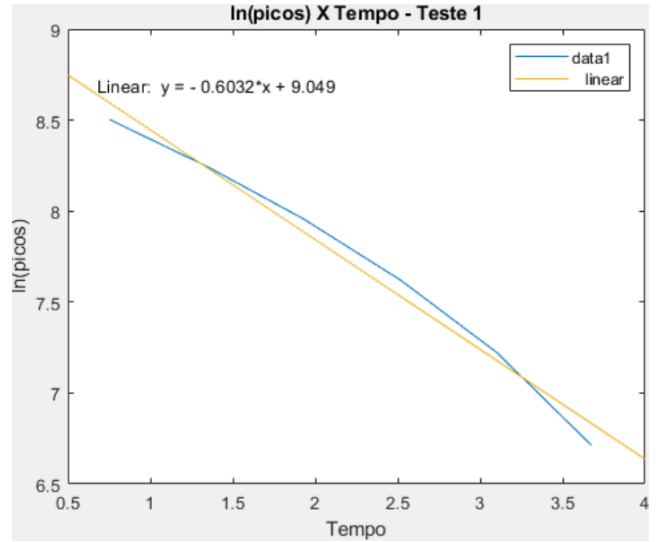


Fig. 4. Amplitudes linearizadas do teste 1. Fonte: Autoral.

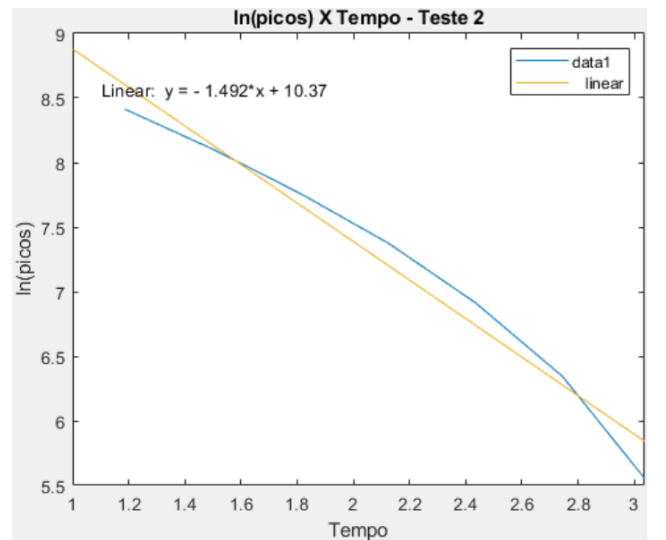


Fig. 5. Amplitudes linearizadas do teste 2. Fonte: Autoral.

Com os valores de $\omega_{n1}, \omega_{n2}, \zeta_1$ e ζ_2 em mãos, é possível resolver o sistema 5

$$\begin{cases} \frac{c_1}{m_1 + 2} = 2\omega_{n1}\zeta_1 \\ \frac{k_1}{m_1 + 2} = \omega_{n1}^2 \\ \frac{k_1}{m_1} = \omega_{n2}^2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{c_1}{m_1 + 2} = 2 \cdot 10,5956 \cdot 0,0569 \\ \frac{k_1}{m_1 + 2} = 10,5956^2 \\ \frac{k_1}{m_1} = 19,6965^2 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} m_1 = 0,8145 \\ c_1 = 3,3954 \\ k_1 = 315,9872 \end{cases} \quad (12)$$

3.2 Validação do modelo

Modelo 3

4. PROJETO DO CONTROLADOR

A princípio, buscamos realizar o controlador proporcional, integrativo e derivativo (PID), por garantir erro nulo para entrada em degrau e por ser amplamente difundido nas indústrias e sistemas de controle em geral. A seguir será explicitado as tentativas para obter esse controlador.

4.1 Primeira tentativa

Para obtenção dos parâmetros foi plotado o lugar das raízes da planta em malha fechada, figuras 6 e 7. Com o lugar das raízes traçados, foi utilizado o *sisotool* para realizar a escolha da localização dos polos e ganho do controlador PID, com isso realizamos o cancelamento de polos mais instáveis, os polos localizados mais a direita do círculo unitário, e escolhemos um ganho arbitrário para sair da instabilidade e obter uma resposta satisfatória. Por fim, implementamos o controle na planta e visualizamos que a resposta obtida na planta não condizia com o esperado visto no *MatLab*, independente da referência inserida, o carrinho não se mexia nada, consequentemente, acreditamos que o ganho do K_p estava baixo e fomos aumentando de forma empírica, após diversos aumentos no K_p , o carrinho começou a se mexer. Sendo assim, a planta modelada era equivalente com o sistema em malha aberta, mas em malha fechada o comportamento era diferente. De forma a elucidar o ocorrido, assumimos de que a falha ocorreu devido aos coeficientes de atrito $C1$ e $C2$, portanto, aumentamos esses parâmetros, empiricamente, até obter uma resposta satisfatória para iniciar novamente o processo de controle mas com uma nova modelagem da planta.

4.2 Segunda tentativa

Sequencialmente após a correção dos parâmetros $C1$ e $C2$, de forma empírica, recalculamos o modelo obtendo as seguintes matrizes do espaço de estados:

Posteriormente foi realizado um novo estudo sobre o lugar das raízes em malha fechada, figura 8, em que aproximando

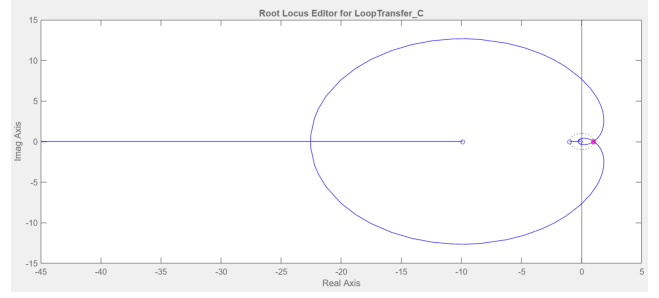


Fig. 6. Lugar da raízes da malha fechada da planta. Fonte: autoral, produzida com *matlab*.

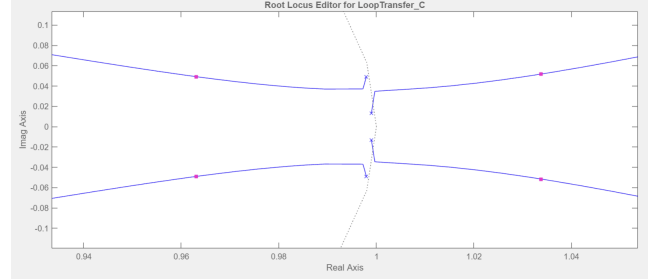


Fig. 7. Lugar da raízes da malha fechada da planta aproximada na extremidade do círculo unitário. Fonte: autoral, produzida com *matlab*.

para próximo da extremidade do círculo unitário temos a figura 9. Em que é possível perceber que a característica da resposta do modelo é fortemente marcada por dois pares de polos conjugados próximos a extremidade do círculo unitário levando para a instabilidade do sistema, como mostra a resposta ao degrau do sistema, figura 10.

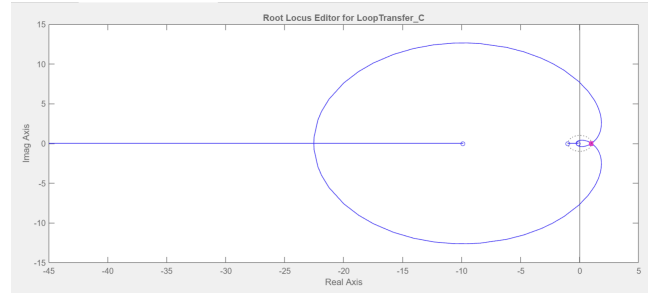


Fig. 8. Lugar da raízes da malha fechada da planta atualizada. Fonte: autoral, produzida com *matlab*.

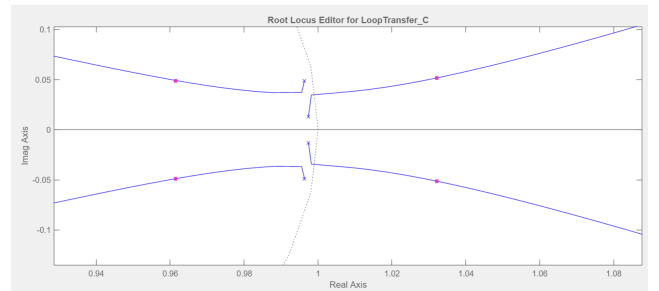


Fig. 9. Lugar da raízes da malha fechada da planta atualizada aproximada na extremidade do círculo unitário. Fonte: autoral, produzida com *matlab*.

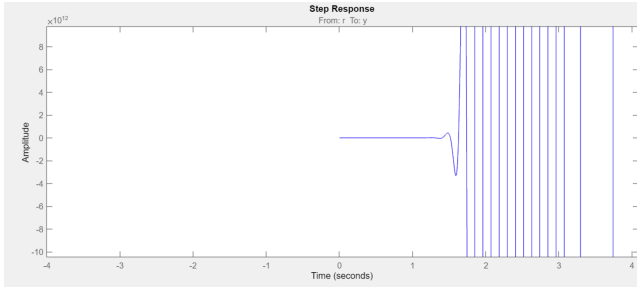


Fig. 10. Resposta ao degrau da planta atualizada, sem controlador, indo para a instabilidade. Fonte: autoral, produzida com *matlab*.

Com isso, foi inserido o integrador e um par de zeros conjugados, controlador PID, próximo ao par de polos conjugados mais a direita do círculo unitário com a finalidade de atraí-los para dentro do círculo unitário, estabilizando o sistema e melhorando a margem de ganho. Nesse processo visualizamos que o integrador colocado fazia com que o lugar das raízes do segundo par de polos conjugados da planta direcionasse para a instabilidade, portanto, procuramos alocar o par de zeros conjugados de forma a garantir a não instabilidade do primeiro par de polos e de aumentar a margem de ganho em relação ao segundo par de polos, para tal, o par de zeros deveria se localizar entre ambos os polos, mas mais próximo do primeiro. O lugar das raízes do controlador é explicitado pelas figuras 11 e 12.

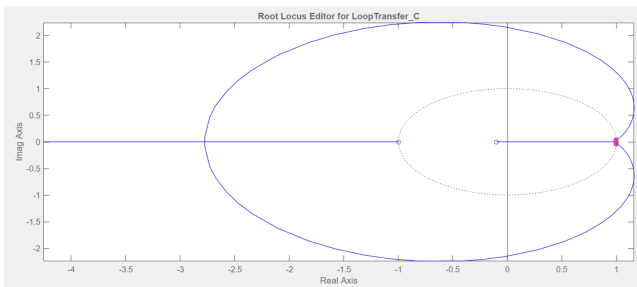


Fig. 11. Lugar da raízes da malha fechada da planta atualizada com controlador PID. Fonte: autoral, produzida com *matlab*.

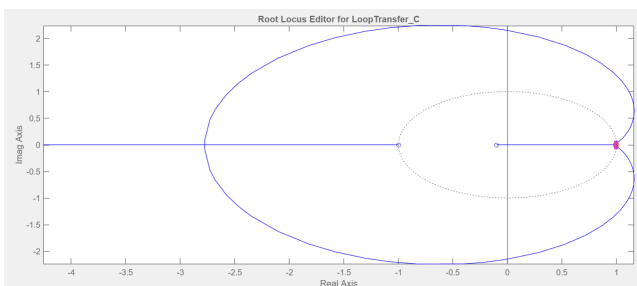


Fig. 12. Lugar da raízes da malha fechada da planta atualizada com controlador PID aproximada na extremidade do círculo unitário. Fonte: autoral, produzida com *matlab*.

Posteriormente, foi ajustado o ganho do controlador visualizando a resposta ao degrau do sistema com controlador, tendo como foco que o tempo de acomodação fosse menor do que 4 segundos e principalmente que não houvesse sobressinal, pois como a planta possui uma margem de

apenas 3 centímetros, sendo que nos 3 centímetros possui uma chave fim de curso em que corta a alimentação do motor, o sobressinal atrapalha muito o controle, a resposta ao degrau obtida é representada pela curva 'Modelado' na figura 13. Por fim, a equação do controlador PID obtido está explicitada na equação 13.

$$C = \frac{0,27951(z^2 - 1,994z + 0,9948)}{(z - 1)} \quad (13)$$

No final, o controlador foi implementado e aplicado um degrau unitário na planta com o objetivo de comparar o resultado real com o esperado pela modelagem, essa comparação é representada pela figura 13.

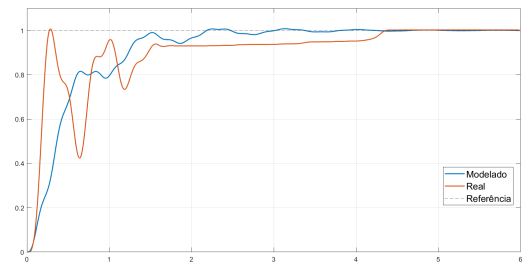


Fig. 13. Comparação da resposta ao degrau em MF da planta em relação ao modelo, com controlador PID. Fonte: autoral, produzida com *matlab*.

Nessa comparação é possível perceber uma dinâmica aproximada entre os modelos, todavia, há algumas divergências nas amplitudes do movimento do período transitório e demora para estabilização no regime permanente.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS EM MALHA FECHADA

Essa seção testa o controle obtido em diversas situações e entradas diferentes na planta.

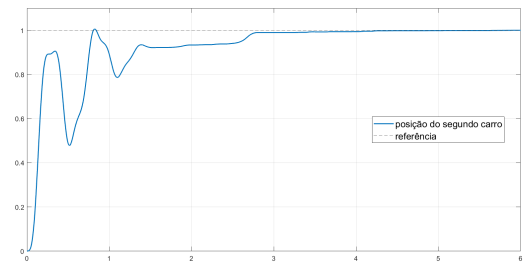


Fig. 14. Resposta ao degrau unitário da planta, carro 1 com 1 peso e carro 2 com 4 pesos. Fonte: autoral, produzido com *matlab* por meio dos dados coletados na planta.

6. CONCLUSÃO

Nery vai concluir o trabalho pra gente!

REFERENCES

Appendix A. A SUMMARY OF LATIN GRAMMAR

Appendix B. SOME LATIN VOCABULARY

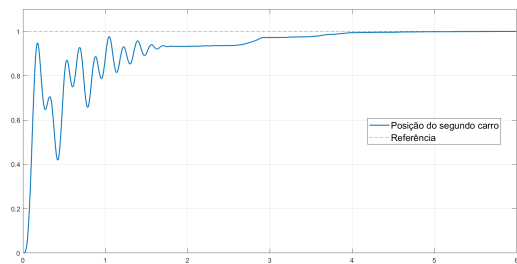


Fig. 15. Resposta ao degrau unitário da planta, carro 1 e 2 com 1 peso. Fonte: autoral, produzido com *matlab* por meio dos dados coletados na planta.

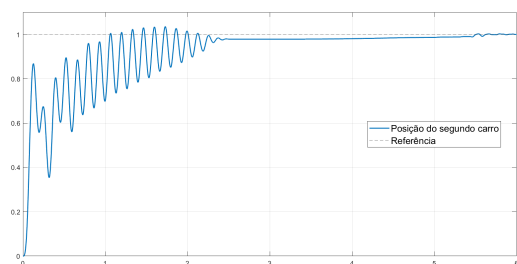


Fig. 16. Resposta ao degrau unitário da planta, carro 1 e 2 com nenhum peso. Fonte: autoral, produzido com *matlab* por meio dos dados coletados na planta.

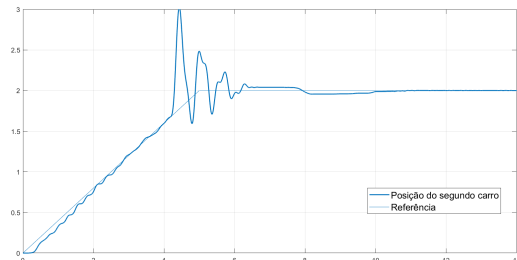


Fig. 17. Resposta a rampa com inclinação de 0,5cm/s e saturação em 2cm, carro 1 e 2 com 4 pesos. Fonte: autoral, produzido com *matlab* por meio dos dados coletados na planta.

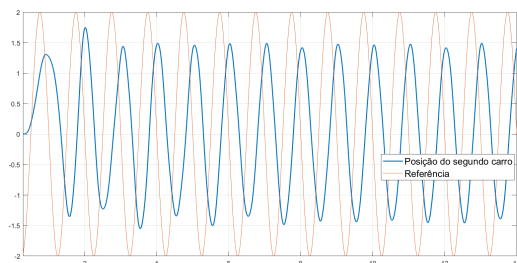


Fig. 18. Resposta a senoide com amplitude de 2cm e frequência de 1 Hz, carro 1 e 2 com 4 pesos. Fonte: autoral, produzido com *matlab* por meio dos dados coletados na planta.