

Relatório do laboratório de controle dinâmico

Identificação e Controle de uma planta de servo motor linear

Abdullah Zaiter - 150089392, Cristóvão B. Gomes 140135081 e Lucas Schiavini - 140150749

Abstract—This document presents the procedures taken and results acquired in the project developed at the Dynamic Control laboratory.

Keywords—Control systems, Systems Identification, PID, State space

Resumo—Este documento apresenta os procedimentos e resultados obtidos no projeto desenvolvido no laboratório de controle dinâmico.

Palavras chave—Sistemas de controle, Identificação de sistemas, PID, programação Espaço de estados.

I. INTRODUÇÃO

Este documento relata a modelagem e controle da planta do *Kit Quanser* linear com controladores de posição P.I.D. e em espaço de estados. Ao longo deste relatório será observado todo o processo de modelagem e identificação de sistemas e também os métodos e técnicas para implementação de controladores P.I.D. e em espaço de estados aprendidos em sala de aula ao longo deste semestre na matéria de laboratório de controle dinâmico. Além disso será feita a comparação do modelo com os dados obtidos do sistema real oferecidos pelo *Kit Quanser*.

Este estudo está dividido em três etapas, na primeira será feita a identificação e modelagem do sistema, serão utilizadas algumas técnicas de análise de dinâmica linear e não linear juntamente com dados técnicos fornecidos pelos fabricantes para determinar matematicamente o comportamento do *Kit* didático [1]. As demais etapas farão uso do modelo determinado nesta etapa.

A segunda etapa descreve o desenvolvimento do projeto de um controlador P.I.D[2]. com compensador de zona-morta e *anti-windup*. Isso será feito com uso de ferramentas disponibilizadas por *softwares* projetados para realizar o posicionamento de polos. Em seguida será realizada a implementação do controlador projetado no *Kit Quanser* e será feita a análise de desempenho de acordo com parâmetros previamente especificados.

De maneira similar à primeira etapa a terceira etapa consiste no projeto e implementação de um controlador de posição porém em espaço de estados. Com isso conclui-se o objetivo de abordar didaticamente estas duas técnicas fundamentais de projeto de controlador que são amplamente utilizadas na indústria.

II. METODOLOGIA

O projeto de um controlador para um carro num trilho do *Kit Quanser* foi uma pesquisa experimental com o intuito de mover o carro seguindo um comportamento especificado.

- Tipo de pesquisa:
Pesquisa experimental, com acesso ao laboratório de Controle Dinâmico, *Kit Quanser*, Computadores do laboratório.
- Dados a serem obtidos:
Saída da planta do kit: Tensão aplicada no motor; Velocidade do carrinho; Posição do carrinho. Essas variáveis permitiram a identificação do sistema e a verificação do controle do mesmo.
- Forma de obtenção dos dados:
Um computador no laboratório com acesso direto ao *Kit Quanser* de forma a obter dados de tensão aplicada do motor, posição e velocidade do carrinho. Esses dados são medidos por meio dos *encoders* da planta e da medida do sinal de alimentação do motor.
- Tratamento e análise dos dados:
Por meio do software *Simulink*, é possível adquirir os dados do *kit Quanser* e armazená-los em forma de tabela num arquivo *.mat*. Dessa forma se torna possível acessar os dados via *MATLAB* e adquirir informações por meio de gráficos.
- Limitações da pesquisa:
O projeto teve de se adaptar às especificações físicas do kit, com blocos de saturação de tensão, que introduz não-linearidades no sistema. Além disso, na análise em espaço de estados não seria possível alocar polos de forma a terem comportamento mais rápido que a taxa de amostragem da planta, evitando que o sistema ficasse instável.

III. MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO

A. Identificação e recompensação da não linearidade

Na realidade, não existem sistemas totalmente lineares, enquanto as técnicas que aprendemos na disciplina teórica são validas e aplicáveis somente em sistemas lineares, logo, quanto mais diminuem-se essas não linearidades[3], os modelos projetados com as ferramentas aprendidas na parte teórica serão mais eficientes e aplicáveis nos modelos reais. Uma não linearidade contornável presente neste projeto é a zona morta do motor, que é o quanto de tensão elétrica o motor precisa para conseguir atuar e se mover. Essa zona morta não costuma ser a mesma para as direções positiva e negativa, isso foi verificado neste projeto.

Para identificação de tais parâmetros da zona morta foi feito um ensaio de teste no motor da planta, aplicando uma onda triangular e capturando a sua resposta, obtendo assim um gráfico do que era esperado caso a nossa planta fosse

de fato linear (vermelho) e a resposta real da planta (azul) encontra-se na figura 9(a).

A partir dos dados do ensaio a cima, foi feita uma média simples para estimar melhor o valor da zona morta positiva e negativa, obteve-se os seguintes valores:

$$\delta^- = -0,02695 \quad (1)$$

$$\delta^+ = 0,54490 \quad (2)$$

Foi feito um bloco de recompensação da zona morta aplicando a função inversa da não linearidade (técnica mostrada pelo professor na aula teórica). Para resolver o problema dessa maneira, é necessário usar condicionais (*ifs*) para checar se o valor é positivo ou negativo. De forma a aplicar o respectivo valor de recompensação, foi necessário utilizar chaves para realizar essas condições como pode ser visto na figura 1. Isso foi feito visto que o *MATLAB* utilizado no laboratório é de 2008, e nele não foi possível adicionar blocos de código.

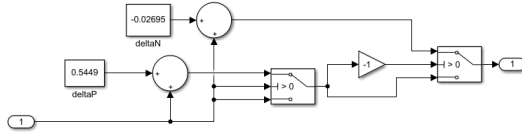


Fig. 1: Bloco de correção da banda morta

B. Identificação do modelo matemático da planta

Para projetar um controlador condizente que satisfaça as especificações demandadas é necessário ter conhecimento preciso sobre a planta onde o controlador atuará, assim, com o intuito de determinar a função de os parâmetros da transferência da planta a ser controlada [4], foi feito um ensaio aplicando uma onda quadrada e capturando a saída da planta, estes dados podem ser visualizados na figura 9(b).

Escolheu-se o modelo de primeira ordem como objetivo de aproximação, por ser mais simples apresentando resultados satisfatórios, este modelo pode ser representado com a equação 3

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau * s + 1} \quad (3)$$

Tendo o valor de Y e de U para espaço de amostras relativamente grande, temos como estimar o valor dos dois parâmetros K e fazendo regressão como orientada com a minimização do erro quadrático.

$$Erro_q = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2 \quad (4)$$

Com isso obteve-se a função de transferência a seguir:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{162.7435}{0.1311s + 1} \quad (5)$$

Essa função de transferência 5 relaciona uma dada entrada de tensão elétrica a uma velocidade no motor, mas como o

nosso controlador terá como objetivo a posição, foi necessário adicionar um integrador a essa função de transferência, obteve então a função de transferência da equação 7.

$$integrador = \frac{1}{s} \quad (6)$$

$$H_f(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{162.7435}{0.1311s^2 + s} \quad (7)$$

IV. CONTROLE PID

Um dos objetivos do laboratório foi de implementar um controlador de posição P.I.D com *anti-windup* e compensador de banda-morta. Esta etapa foi realizada com uso da interface *MatLab-Simulink* com o *Kit Quanser* linear didático.

A banda-morta foi implementada com uso de chaveamentos condicionais no *Simulink*, esta estratégia simplesmente adiciona o valor de tensão constante correspondente para cada um dos valores de banda-morta (valores na movimentação à esquerda são diferentes dos à direita) como mostra a figura 2, os valores de tensão são correspondentes aos deltas das equações 1 e 2.

Para o projeto do controlador foi utilizada a ferramenta *Control System Designer* disponibilizada pelo *Simulink*. Nela pôde-se adicionar os polos e selecionar os ganhos de forma que os requisitos fossem cumpridos, portanto foram adicionados um polo na origem (proveniente do integrador), um zero e uma constante. Estabeleceu-se que o *overshoot* máximo aceitável seria de 10% e que o tempo de subida desejado seria de um segundo. Desta forma pode-se ajustar os ganhos que garantissem essa especificação. Os valores dos ganhos determinados foram os seguintes:

$$KP = 0.1986 \quad (8)$$

$$KD = 0.0281 \quad (9)$$

$$KI = 0.1538 \quad (10)$$

Em que "KP" é o ganho proporcional, "KD" o ganho do derivador e "KI" o ganho do integrador. Com uso desses valores pôde-se construir uma simulação utilizando o controlador P.I.D em conjunto com o modelo de planta de primeira ordem determinado na modelagem. Pode-se observar que foi usado também um saturador de modo que a tensão sobre o motor não ultrapassasse uma magnitude maior do que 6 Volts.

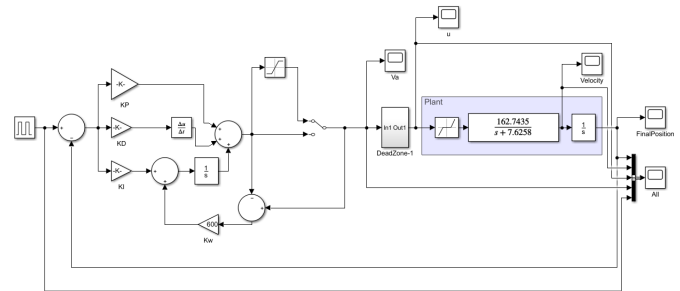


Fig. 2: Modelo da planta com controlador P.I.D

A figura 2 Mostra o esquemático da simulação, nela pode-se observar da esquerda para a direita: a entrada de

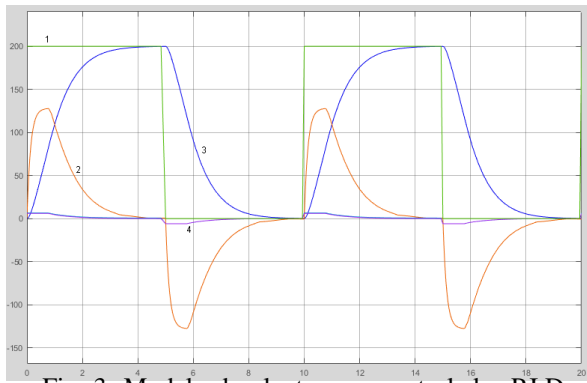


Fig. 3: Modelo da planta com controlador P.I.D.

sinal, que é o valor da posição que se deseja obter na saída, seguida dos módulos P.I.D., em que sobre o módulo do integrador está atuando o módulo de *anti-windup* [5], em seguida tem-se um bloco saturador seguido de um seletor de ativação deste bloco, depois a função inversa da zona morta (chaveamento) e finalmente a planta que realimenta a entrada. Há um *scope* à extremidade direita que tem quatro valores de entrada, na simulação estes valores foram salvos em uma matriz para posterior análise. A figura 3 mostra os valores que foram salvos nesta matriz, é o gráfico de quatro valores resultados da simulação, indicado pelos índices numéricos representando a entrada, a velocidade, a posição (saída) e a tensão de entrada na planta respectivamente, em ordem crescente.

Portanto pôde-se concluir que a simulação apresentou um comportamento satisfatório pois cumpriu os requisitos e que poder-se-ia seguir com a implementação do controlador sobre a planta real do *Kit Quanser*. Para isso bastou utilizar a planta simulada e utilizá-la com o arquivo do *template* linear fornecido em sala de aula.

O comportamento do carro no *Kit Quanser* foi como o esperado. O sistema apresentou estabilidade, uma boa velocidade e uma boa resposta a perturbações. Os dados do sistemas foram colhidos para o *MatLab* sendo atribuídos a uma matriz que pode ser visualizada graficamente. Na figura 4 tem-se um ciclo da entrada e da saída (em centímetros) no mesmo gráfico. Ao analisar o gráfico tem-se que o tempo de subida é em torno de 1,5 segundos e o tempo de assentamento em torno de 1,6 segundos e não apresentou sobressinal.

Na figura 5 estão representados além de entrada e posição os valores nas saídas dos módulos proporcional, integrador e derivador. O sinal que se comporta como um impulso corresponde ao módulo derivador e o sinal de menor amplitude representa o módulo integrador. O módulo proporcional não foi representado pois é igual a entrada com amplitude variada. A imagem também mostra a partir do primeiro período a resposta a algumas perturbações feitas sobre o carro (deslocamentos forçados com a mão sobre ele) quando ele atingia o estado estacionário.

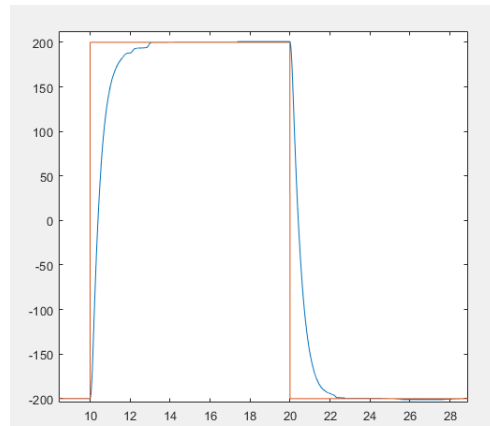


Fig. 4: Entrada e saída da planta controlada com P.I.D.

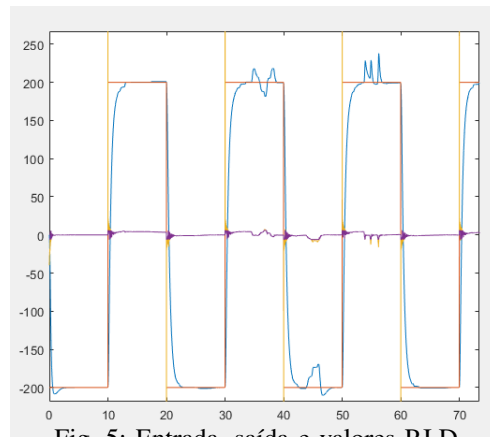


Fig. 5: Entrada, saída e valores P.I.D.

V. CONTROLE NO ESPAÇO DE ESTADOS

O projeto foi realizado também em Espaço de Estados. A diferença entre o controle no espaço de estados para métodos clássicos de controle como L.G.R. é que no espaço de estados, a forma de colocar polos não leva em conta somente os polos dominantes do sistema, todos os polos desejados são colocados nas posições designadas. Dessa forma, é obtida a matriz *K* de *feedback*, por meio da fórmula de Ackerman, que regula o sistema para obter um comportamento desejado a partir da localização dos polos desejados.

De forma a realizar esse controle, todas as variáveis de estado devem poder ser medidas, o sistema deve ser de estado controlável e o sinal de controle deve ser um escalar. Uma alternativa de poder medir todas as variáveis de estado de um sistema é colocar no projeto um observador.

Como o sistema estava dentro dessas especificações, o controle no espaço de estados foi realizado como descrito a seguir.

Primeiro, foi reutilizada a função de transferência anteriormente obtida por meio da identificação do sistema. Em seguida essa função de transferência do sistema foi colocada na forma canônica do controlador. De forma a confirmar os resultados, este foi validado com a função *tf2ss* no software *MATLAB*.

Assim, foram obtidos valores para o seguinte sistema:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (11)$$

$$y = Cx \quad (12)$$

$$A = \begin{bmatrix} -7.6258 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$C = [0 \quad 162.7435] \quad (14)$$

De forma a prosseguir a modelagem, foi necessário testar as condições de Controlabilidade e Observabilidade do sistema. Utilizado o código da figura 6, foi obtido que o sistema possuía as especificações para que a alocação de polos do controlador e do observador pudessem prosseguir.

```
%Test Controlability and Observability

Co = ctrb(A,B);
unco = length(A) - rank(Co)

Ob = obsv(A,C);
% Number of unobservable states
unob = length(A) - rank(Ob)
```

Fig. 6: Código de teste de Controlabilidade e Observabilidade

Assim, de forma a alocar polos do controlador foi necessário obter a Matriz A_c da dinâmica do sistema em malha fechada.

$$A_c = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Foi obtido também a matriz B_c :

$$B_c = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

De forma a utilizar o esquemático da figura 7, foi necessário calcular cada termo do controlador e observador do sistema.

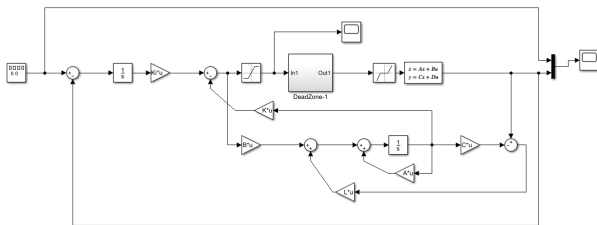


Fig. 7: Controlador em Espaço de Estados

Dessa forma, com o software *MATLAB* foi utilizado a função *acker* de forma a obter a matriz K com os polos do controlador em pontos específicos.

De forma a manter as especificações para um sistema controlado por espaço de estados, foi colocado um observador de estados de forma semelhante ao controlador. Novamente,

utilizou-se a função *acker* para obter a matriz de alocação dos polos.

Inicialmente, foram utilizados polos do controlador não afastados o suficiente para que o sistema se comportasse como um sistema de primeira ordem. Além disso os polos do observador estavam muito rápidos, com uma frequência superior à taxa de amostragem do *Kit Quanser*, tornando o sistema instável.

Após tentativas, o melhor resultado para o sistema foi obtido com os seguintes dados:

- polos do controlador = -10, -10, -1
- polos do observador = -30, -30

Os resultados obtidos:

$$K = [13.3742 \quad 120.00001] \quad L = \begin{bmatrix} 3.0760 \\ 0.3218 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$K_i = [-0.6145] \quad (18)$$

Com a correção dos polos do observador e do controlador, o sistema obteve um comportamento sem *overshoot* e com tempo de assentamento próximo a 2 segundos como pode ser visto na figura 8. No entanto, o sistema ficou sensível a sinais em alta frequência. É possível ver essa sensibilidade na figura 11(a) do anexo com variações bruscas tanto na velocidade do carrinho quanto na tensão aplicada no motor.

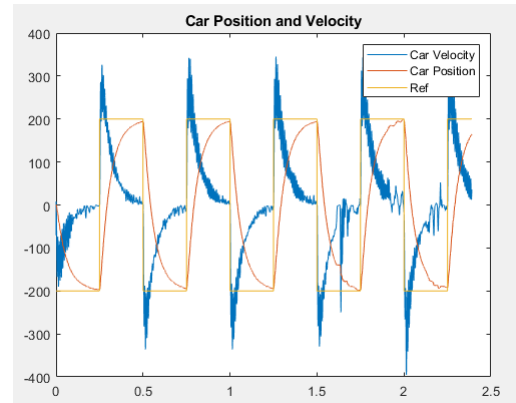


Fig. 8: Sinal de Referência e posição do carrinho

Dados do observador também foram coletados, como pode ser visto na figura 11(b) do anexo. Além disso, é possível perceber que o comportamento da tensão do motor segue o comportamento da diferença entre as saídas no observador figura 11(c) do anexo.

A partir do tempo de $1.5E4$ o sistema demonstra resposta a uma perturbação externa (figura 8), com leve alteração da posição atual, demonstrando em partes, a robustez do sistema.

VI. CONCLUSÕES

Ao longo deste relatório foi observado todo o processo de modelagem e identificação de sistemas e também os métodos e técnicas para implementação de controladores aprendidos em sala de aula ao longo deste semestre na matéria de

laboratório de controle dinâmico: P.I.D. com análise em LGR; Espaço de estados com canal integral.

Na modelagem e identificação foi feita a determinação do sistema e suas não linearidades, a partir da análise dos dados percorridos do relatório pôde-se assumir que a planta apresenta comportamento de primeira ordem em malha aberta para este projeto, já que este modelo atendeu às especificações previamente estabelecidas na implementação do controlador. Entretanto vale ressaltar que tal modelo pode ser insuficiente para aplicações que requerem mais precisão, neste caso seria necessária uma análise mais minuciosa dos fenômenos de ordem superior que atuam sobre a planta.

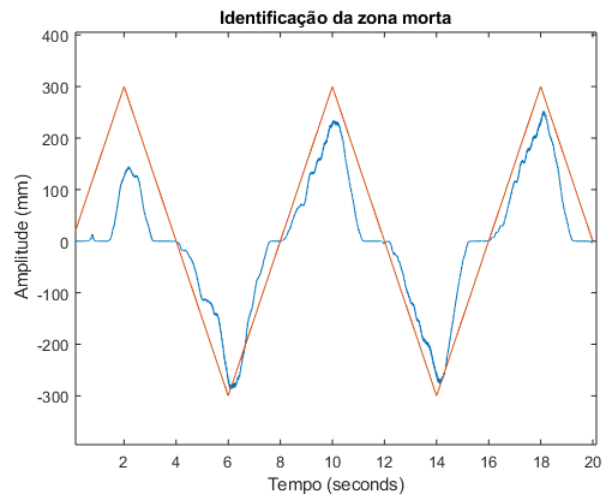
REFERENCIAS

- [1] Quanser Linear Servo Base Unit User Manual
- [2] Ogata, K. (2010) Modern Control Systems. 5th Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River.
- [3] Tutorial de modelagem de sistemas não lineares <<https://www.mathworks.com/help/ident/nonlinear-model-identification-basics.html>>. Último acesso em: 02 dez. 2018.
- [4] Tutorial de identificação de sistemas do Matlab <<https://www.mathworks.com/help/slcontrol/ug/system-identification-of-plant-models.html>>. Último acesso em: 02 dez. 2018.
- [5] Tutorial de controlador PID Anti-Windup <<https://www.mathworks.com/help/simulink/examples/anti-windup-control-using-a-pid-controller.html>>. Último acesso em: 02 dez. 2018.
- [6] Profº Geovany Borges, Notas de Aula

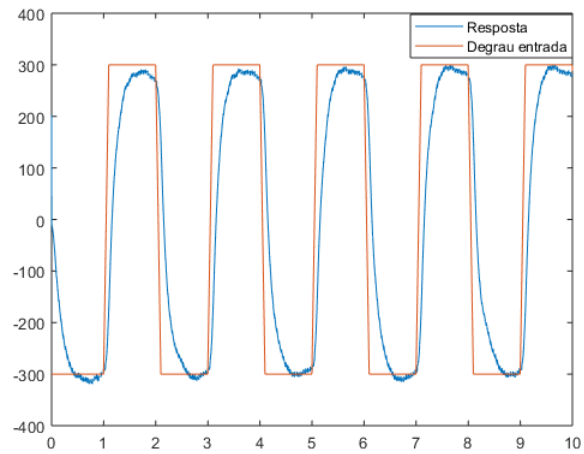
ANEXOS

Modelagem e identificação:

Fig. 9: Conjunto de figuras da identificação e modelagem do sistema



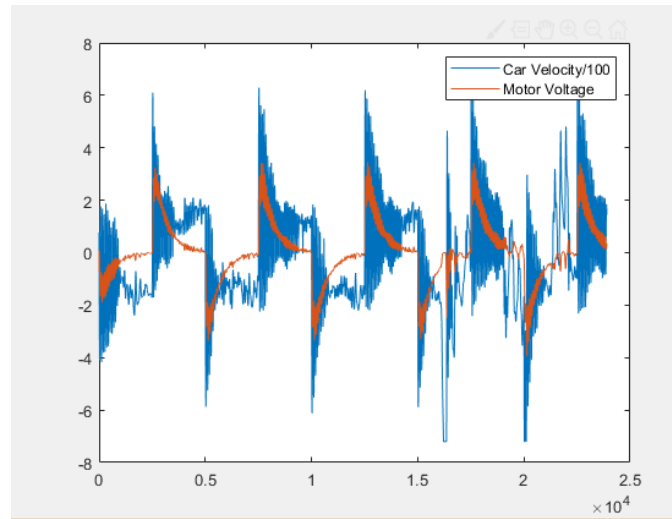
(a) Onda triangular e a resposta do motor



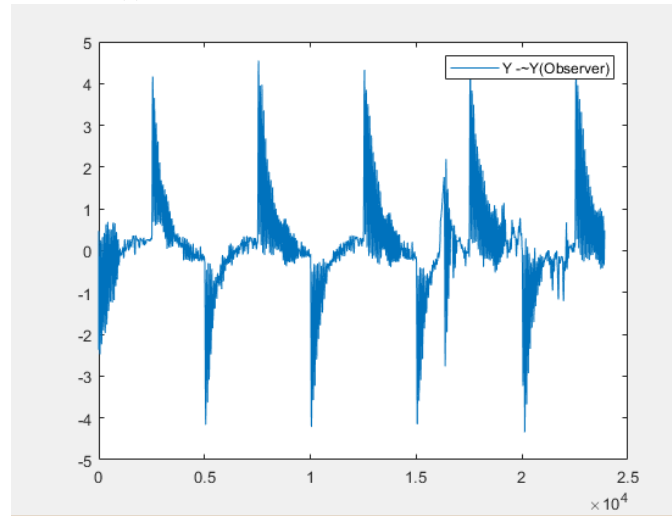
(b) Resposta da planta após excitação

Espaço de Estados

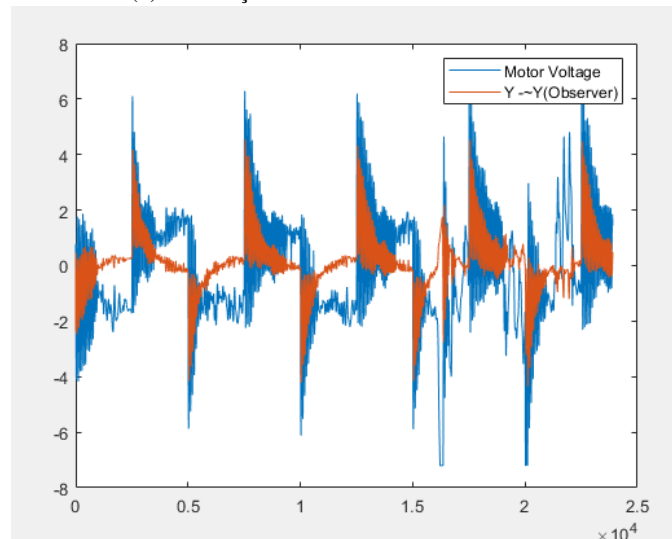
Fig. 11: Conjunto de figuras do Espaço de Estado



(a) Tensão do motor e Velocidade do Carrinho



(b) Diferença de saída obtida no observador



(c) Tensão do motor e Diferença de saída no observador