

IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS POR FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA UTILIZANDO *SYSTEM IDENTIFICATION* *TOOLBOX* DO MATLAB¹

Lucas Aparecido Silva KITANO²
Graduando em Engenharia Eletrônica
IFSP/Câmpus São Paulo

Daniele Pereira de SOUZA³
Graduanda em Engenharia Eletrônica
IFSP/Câmpus São Paulo

Hugo Magalhães MARTINS⁴
Mestre em Engenharia de Automação e Controle
Docente de Engenharia Eletrônica
IFSP/Câmpus São Paulo

RESUMO

Neste trabalho é mostrado o uso de *System Identification Toolbox* do MATLAB na estimação de um sistema baseado na resposta do sensor de álcool MQ-3. A Identificação de Sistemas é importante quando um processo não é facilmente modelado a partir de seus princípios físicos. O foco da pesquisa é analisar a Identificação de Sistemas por uma das representações mais comuns e introdutórias no estudo da modelagem, a função de transferência, e verificar a importância no uso de filtros no pré-processamento dos dados analisados. Foi considerada individualmente e em conjunto a aplicação de dois tipos de filtros, o passa-baixas (análogo) e o média móvel (digital). Nas funções de transferência obtidas, foram analisadas a precisão de estimação com diferentes ordens de sistema através da comparação do modelo obtido com o real e a simulação na ferramenta Simulink, também do MATLAB. Pôde-se observar que algumas considerações de domínio teórico devem ser levadas em consideração e que as condições iniciais do processo influem diretamente na precisão do modelo obtido.

Palavras-chave: Identificação de Sistemas. Modelagem dinâmica de sistemas. *System Identification Toolbox*. Filtros.

¹ Trabalho resultante de projeto realizado na disciplina de Modelagem do curso de Engenharia do IFSP/SP. Orientador Prof. Me. Hugo Magalhães Martins.

² Endereço eletrônico: lucaskitano@outlook.com

³ Endereço eletrônico: danielep.souza23@gmail.com

⁴ Endereço eletrônico: hugo.magalhaes@ifsp.edu.br

Introdução

A modelagem de um sistema é uma representação análoga matemática que descreve as principais características e propriedades observadas nesse sistema (ANTUNES, 2007). Entretanto, dependendo do sistema, nem sempre é possível obter um modelo matemático que o represente satisfatoriamente, sendo necessário o estudo de técnicas alternativas a esse tipo de modelagem; a esse estudo se dá o nome de Identificação de Sistemas (AGUIRRE, 2004).

Na Identificação de Sistemas há diversas ferramentas matemáticas e algoritmos que permitem construir modelos dinâmicos a partir dos dados observados, e algumas etapas são necessárias para a sua aplicação em um sistema real do qual se necessita obter um modelo, tais como: aquisição de dados, escolha da representação do sistema e validação do modelo.

A aquisição de dados é a coleta de amostras representativas do processo e pode ser acompanhada por um pré-processamento, como a aplicação de filtros para minimizar a interferência de ruídos que possam prejudicar os resultados obtidos. Em relação à escolha da representação do sistema, há diversas maneiras matemáticas e, mesmo depois de escolhida a representação do modelo, é necessário definir a sua estrutura, a exemplo da dimensão do modelo. Já na validação do modelo, verifica-se se o obtido incorpora as características de interesse do sistema original, sendo que a maneira mais comum de fazê-lo é a comparação do modelo obtido com os dados reais do sistema (ANTUNES, 2007).

Dentre essas três etapas, a escolha de representação do modelo é a mais crítica no processo de Identificação de Sistemas, pois é necessário observar as características do sistema a ser modelado e conhecer as diferentes representações possíveis, como equações diferenciais, funções de transferência, modelo por espaço de estados, entre outras.

Nesse sentido, este trabalho visa a apresentar a análise da Identificação de Sistemas por uma das representações mais comuns e introdutórias no estudo da modelagem de sistemas, a função de transferência, que exprime a relação entrada-saída de um sistema, ou seja, descreve como uma determinada entrada se manifesta de forma dinâmica para a saída desse sistema (SILVA, 2015 *apud* AGUIRRE, 2004).

Essa representação é comumente realizada no domínio de Laplace e representada por dois polinômios no domínio “s”; o polinômio associado à saída Y(s) é colocado no numerador, e o polinômio associado à entrada X(s), no denominador; a essa relação G(s) é chamada função de transferência de um sistema (SILVA, 2015), sendo dada por:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 + b_1s^1 + b_2s^2 + \dots + b_qs^q}{a_0 + a_1s^1 + a_2s^2 + \dots + a_qs^q}$$

A ordem do sistema é definida pelo grau do denominador $X(s)$, definindo a estrutura do modelo, sendo que, quanto mais complexo é um sistema, maior é o seu grau: um sistema de grau 1 é dito de primeira ordem, de grau 2, de segunda ordem, e assim por diante.

Formados por polinômios, tanto o numerador quanto o denominador possuem raízes, sendo as raízes do numerador chamadas de zeros e as do denominador de polos; geralmente, na Identificação de Sistemas por função de transferência, é definido primeiro o número de polos e zeros desejados (ordem do sistema), para em seguida o algoritmo identificador determinar a melhor função de transferência que represente aquele modelo.

Material e Métodos

O processo a ser analisado será a resposta do sensor de álcool MQ-3 quando exposto a partículas de álcool Isopropanol (99,8% álcool). O sensor MQ-3 é montado em um módulo para facilitar o seu uso com microcontroladores; a camada de detecção de vapores de álcool (e etanol) é realizada pela parte laranja arredonda da Figura 1:



Figura 1: Módulo do sensor MQ-3
Fonte: FILIPEFLOP (2017) e Autores

Seu funcionamento se baseia em reações químicas: quando as partículas de álcool entram em sua camada de detecção, variam proporcionalmente a sua resistência interna e se manifestam como resposta em sua saída analógica com resolução de 10 bits. Para captação do sinal desse sensor (aquisição de dados) e comunicação com o computador, foi utilizada a placa Arduino Uno, uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto e com diversos modelos de placas.

Como parte do pré-processamento do sinal, será ainda analisada a aplicação de dois filtros na resposta do sensor. O primeiro será um filtro analógico, composto por um resistor e um capacitor constituindo um filtro RC série do tipo passa-baixas, o qual atenua as componentes de alta frequência. O outro filtro a ser analisado será um do tipo digital

(implementado por *software*) conhecido como média móvel, que apresenta na saída um valor correspondente à medida das diversas amostras de entradas mais recentes (PIRES, 2017). A sua equação é mostrada em

$$Y[n] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X[i]$$

A média móvel, a identificação do sistema e a validação do modelo serão realizadas no software MATLAB – *Matrix Laboratory*. O MATLAB é um *software* de alto desempenho voltado para cálculo, processamento de sinais e construção de gráficos, sendo a coleta e a transferência de dados para o computador possíveis com a instalação do pacote Arduino para o MATLAB.

O MATLAB possui diversas *toolboxes* (ou ferramentas auxiliares) para aplicação em diferentes áreas do conhecimento; para a Identificação de Sistemas, há a *System Identification Toolbox*, ou Identificador de Sistema, cuja aplicação é para a construção de modelos matemáticos dinâmicos a partir de dados de entrada e saída adquiridos de um sistema, permitindo criar e usar modelos dinâmicos que não são facilmente produzidos a partir de princípios físicos e ainda possibilitando a validação do modelo através da comparação dos resultados simulados com os valores reais coletados, o que permite verificar dentre os modelos obtidos qual possui o menor erro em relação ao sistema real (SILVA, 2015).

Ainda como validação do modelo será utilizada outra ferramenta adicional do MATLAB, o Simulink, uma ferramenta computacional constituída por uma biblioteca de blocos integrada ao MATLAB para modelação, simulação e análise dinâmica de sistemas (PINHEIRO, 2012).

Com o modelo obtido, pretende-se fazer uma análise para além da validação do modelo, verificando as possíveis considerações e limitações da função de transferência obtida pelo Identificador de Sistema, bem como demonstrar a importância de um pré-processamento adequado para a filtragem do sinal a ser analisado.

Resultados e discussão

A análise da resposta do sensor MQ-3 consiste em um sistema de malha aberta. Tal resposta foi obtida mediante a aplicação de uma entrada degrau com amplitude de 5V; uma pequena película de papelão foi fixada no eixo de um servomotor formando uma espécie de

cancela, bloqueando a camada de detecção do sensor quando a entrada fosse igual a 0V (cancela fechada); com o degrau aplicado, o acionamento do servomotor (cancela aberta) permitia a detecção das partículas de álcool no ambiente pelo sensor MQ-3.

Um programa foi escrito no MATLAB para acionamento do servomotor, armazenamento dos dados do processo (como a entrada degrau) e a resposta do sensor captada pela entrada analógica da placa Arduino Uno, bem como a obtenção dos gráficos de entrada e saída do processo.

Inicialmente, a resposta do sensor foi obtida sem a aplicação de nenhum filtro (Figura 2(a)), e percebeu-se a interferência de altas frequências nas amostras obtidas. Em seguida, foi aplicado o filtro RC passa-baixas, com frequência de corte definida em 15,9Hz; percebeu-se neste caso que a resposta do sensor obtida (Figura 2(b)) não sofreu maiores influências das componentes de altas frequências.

Em seguida foi retirado o filtro RC, para a análise isolada do filtro digital média móvel, a resposta do sensor obtida foi diferente da resposta da Figura 2(a), com o aparecimento de mais componentes de altas frequências interferindo (Figura 3).

Esse é um dos principais problemas do não-uso de filtros no pré-processamento do sinal, uma vez que a cada coleta de amostras as interferências irão se manifestar de forma diferente. Note-se que, apesar de estarem nas mesmas condições e representando o mesmo processo, o sinal da Figura 2(a) parece muito diferente do da Figura 3.

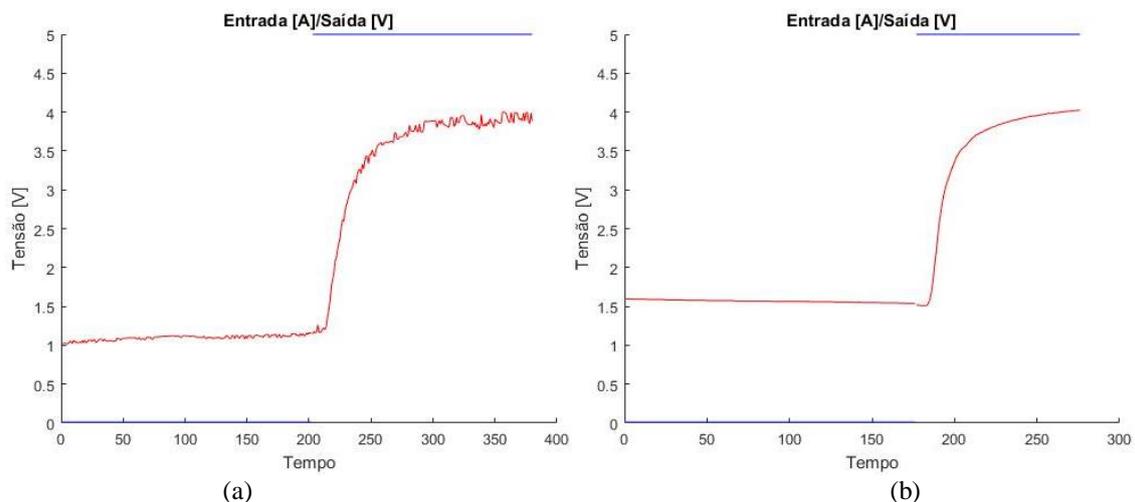


Figura 2: Respostas do sensor – (a) sem o filtro RC; (b) com o filtro RC
Fonte: Autores

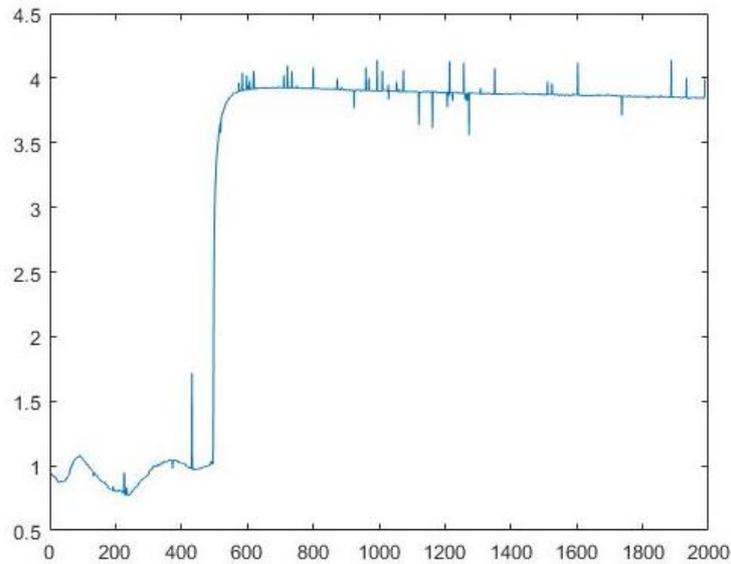


Figura 3: Resposta do sensor com mais componentes de altas frequências
Fonte: Autores

No sinal da Figura 3, foi aplicada pelo próprio MATLAB a média móvel. A Figura 4 mostra os sinais pós-processados para os valores de “N” da média móvel como 4, 8, 16 e 32.

Quanto maior o valor de “N”, mais as componentes de altas frequências ocasionadas pelas interferências externas são diluídas pelo sinal: com $N=32$, são praticamente removidas. É importante salientar que um filtro digital, ao contrário do filtro analógico, consome processamento do sistema, assim, quanto maior o valor de “N”, maior será seu gasto em armazenar as amostras anteriores. Além disso, um alto valor de “N” implica numa demora mais acentuada para uma verdadeira mudança no sinal de entrada se refletir de forma precisa na saída.

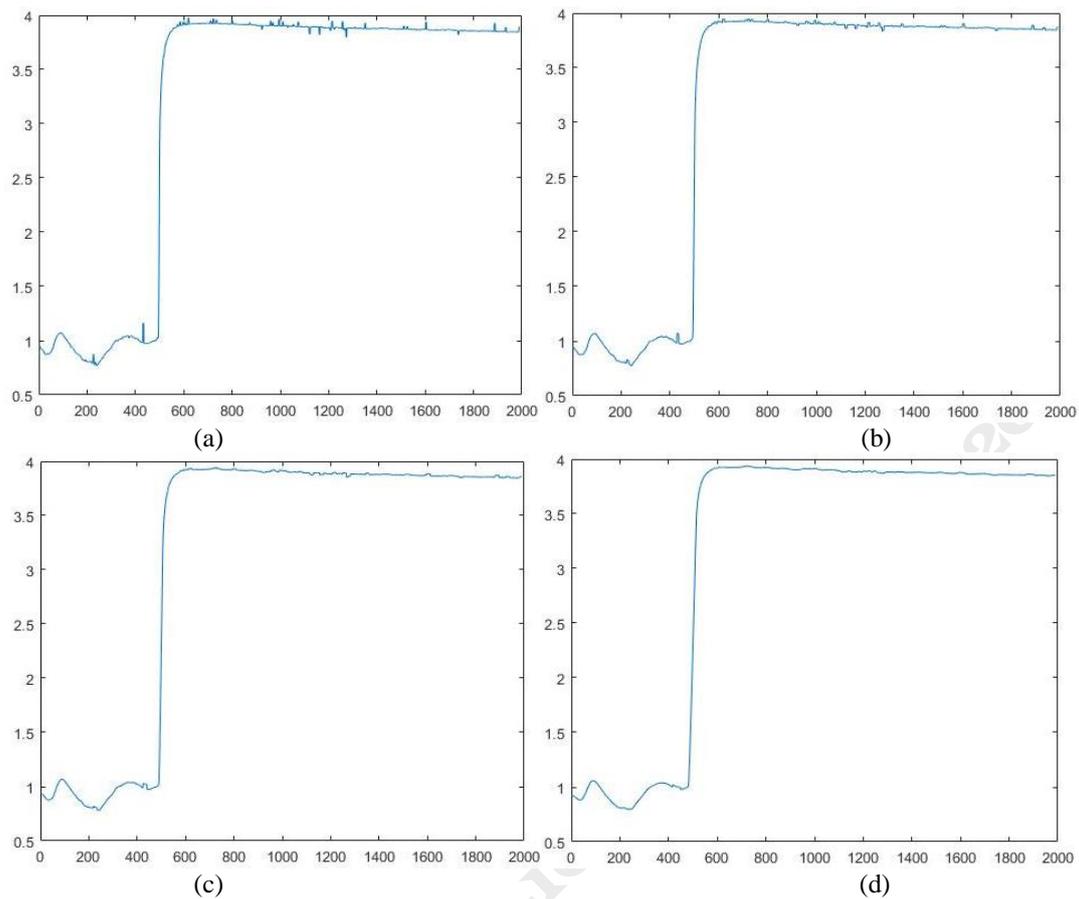


Figura 4: Respostas do sensor após aplicação da média móvel – (a) $N=4$; (b) $N=8$; (c) $N=16$; (d) $N=32$
Fonte: Autores

Para a identificação do sistema foram considerados ambos os filtros, uma vez que a resposta do sensor já está bem filtrada apenas com o filtro RC, o valor de “N” da média móvel foi definido em 16. A Figura 5 mostra o sinal de entrada bem como a resposta do sensor após a aplicação de ambos os filtros.

No Identificador de Sistemas existem diversos modelos para estimação do sistema, tais como função de transferência, ARX, ARMAX, modelo por espaço de estados, entre outros (SILVA, 2015); neste trabalho foi considerado como estimador a função de transferência, em que para a estimação inicial foi definido o modelo mais simples de função de transferência, isto é, com apenas um polo e um zero, configurando um sistema de primeira ordem. O modelo estimado atingiu a precisão de 62% (curva azul da Figura 6) conforme a sua comparação com a resposta real do sistema (curva preta da mesma Figura).

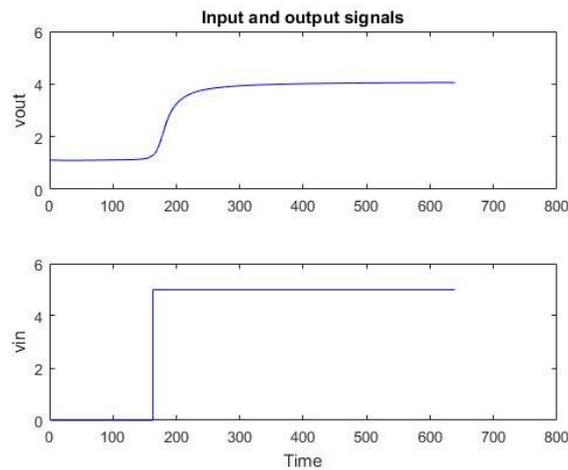


Figura 5: Sinais de entrada e saída para aplicação no Identificador de Sistemas
Fonte: Autores

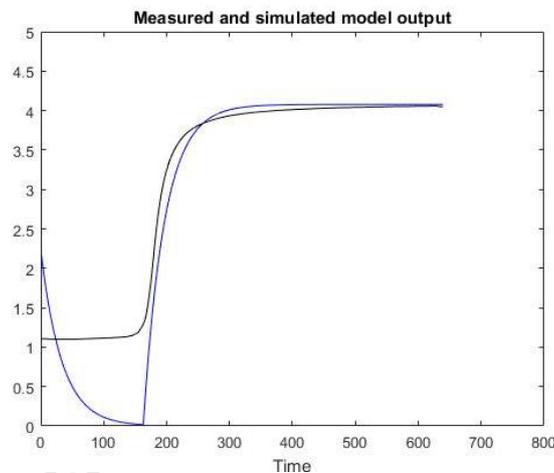


Figura 6: Estimação da função de transferência para um polo
Fonte: Autores

Com o objetivo de aumentar a precisão de estimação, foi obtido o modelo com um sistema de segunda ordem, com dois polos e um zero (Figura 7). O sistema atingiu precisão de 95,98%; a validação do modelo mostra grande similaridade entre o modelo simulado (curva vermelha da Figura 7) e o real (curva preta da mesma imagem).

Para um sistema de terceira ordem com três polos e três zeros, a precisão foi de 74,83%, logo, a melhor estimação foi de um sistema de segunda ordem, com a função de transferência $G(s)$ dada por:

$$G(s) = \frac{0.02222s + 5.737 * 10^{-5}}{s^2 + 0.04001s + 6.685 * 10^{-5}}$$

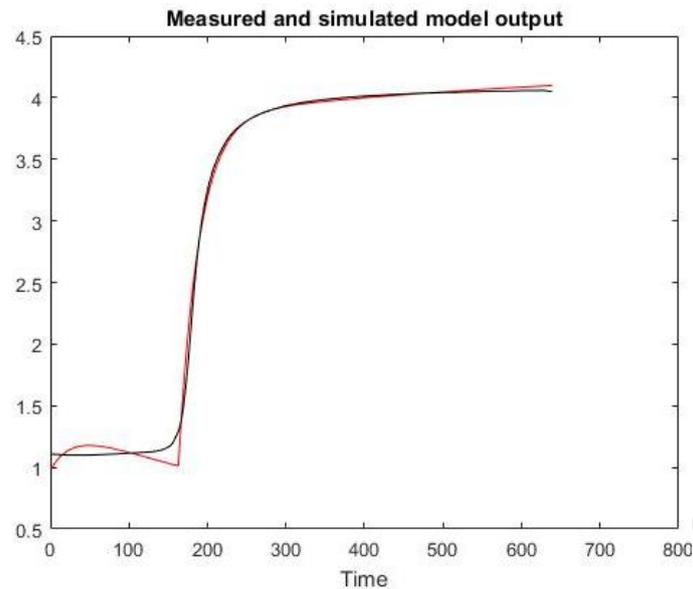


Figura 7: Estimação da função de transferência para um sistema de segunda ordem
Fonte: Autores

Ao analisar a resposta do sensor antes da aplicação do degrau (Figura 5), é possível observar que o valor não é nulo, pois o MQ-3 capta algumas moléculas de gás isoladas do ambiente, o que justifica esse valor residual. Para captar um valor nulo, o sensor teria de estar isolado a vácuo (condições ideais), assim, esse valor não-nulo seria a condição inicial do processo, como um capacitor em um circuito RC com uma carga inicial. Esse valor não-nulo influi diretamente na estimação do sistema, e tal influência pode ser comprovada ao se realizar um off-set no sinal de resposta do sensor, forçando-a a assumir valores nulos antes da entrada degrau (Figura 8).

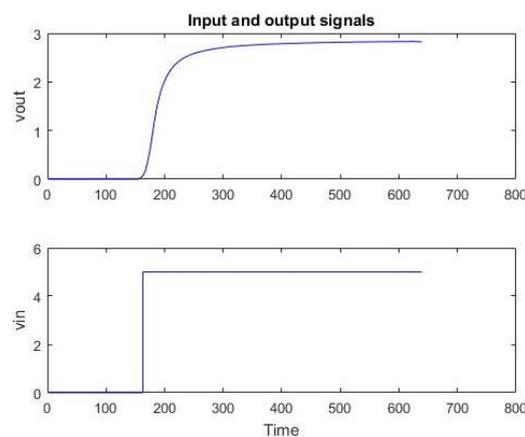


Figura 8: Entrada e saída do sistema com off-set na saída
Fonte: Autores

Para o sinal da Figura 8, a estimação da função de transferência para um sistema com apenas um polo e nenhum zero (primeira ordem) atingiu precisão de 96,07%, conforme a Figura 9, com a curva azul representando o modelo obtido, e a curva preta, o sistema real.

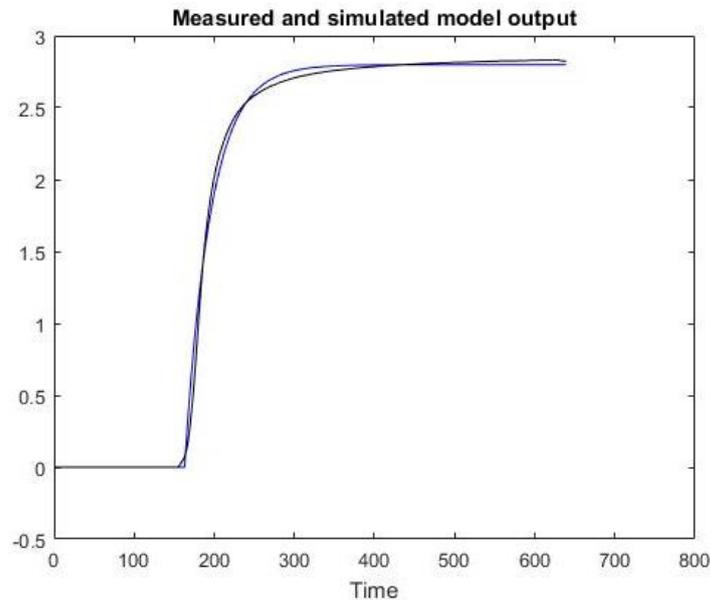


Figura 9: Estimação do modelo off-set
Fonte: Autores

A comparação de estimações do modelo obtido considerando as condições iniciais (Figura 7) do sensor, bem como forçando essas condições a serem nulas (Figura 9), mas ainda mantendo a dinâmica do sistema, permite observar que, com as condições iniciais, apenas um sistema de segunda ordem atingiu precisão acima de 95%, enquanto que, no segundo caso, um sistema de primeira ordem foi o suficiente, atingindo precisão superior ao primeiro cenário, logo, há influência das condições iniciais na estimação do sistema.

A função de transferência obtida na estimação do sinal da Figura 9 é dada por $G1(s)$:

$$G1(s) = \frac{0.01723}{s + 0.03079}$$

As funções de transferência obtida para o modelo com condições iniciais $G(s)$ não possuem nenhum termo que exprima essas condições iniciais, e, ainda, tanto $G(s)$ e $G1(s)$ não consideram o atraso na aplicação do degrau; ao se observar o sinal de entrada (Figuras 5 e 8), pode-se perceber que o degrau não foi aplicado na primeira amostra (ou $t=0$), mas sim na amostra de número 163, no domínio de Laplace, e esse atraso é representado por uma

exponencial com a variável independente “s” multiplicada pelo valor do atraso (OGATA, 2010), logo, a mais correta representação de G(s) e G1(s) é dada por G'(s) e G1'(s), respectivamente:

$$G'(s) = e^{-163s} \frac{0.02222s + 5.737 * 10^{-5}}{s^2 + 0.04001s + 6.685 * 10^{-5}}$$

$$G1'(s) = e^{-163s} \frac{0.01723}{s + 0.03079}$$

Isso permite observar que, no modelo obtido utilizando a estimação como função de transferência do Identificador de Sistemas do MATLAB, devem ser feitas algumas considerações na função de transferência obtida para que ela reflita o mais próximo possível o modelo do sistema real.

Com o Simulink, é possível fazer outra verificação do modelo, implementando as funções de transferência obtidas em blocos e definindo o sinal de entrada nas mesmas condições do modelo real, isto é, amplitude de 5V e atraso quando t=163 (Figura 10).

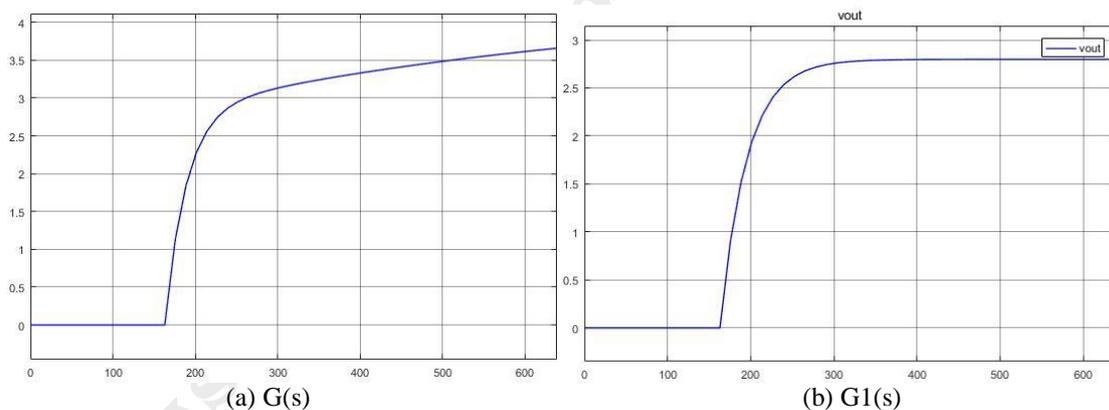


Figura 10: Respostas dos modelos obtidos no Simulink
Fonte: Autores

Ao comparar o modelo simulado no Simulink com o modelo estimado pelo Identificador de Sistema, é possível observar que o sinal da Figura 10(a) é diferente do sinal da Figura 7 (curva vermelha), justamente pelo fato de que, no modelo obtido em G(s), não há um termo que leve em conta as condições iniciais do sistema, as quais ali foram consideradas como parte da resposta do sistema, ao passo que o sinal da Figura 10(b) é idêntico ao da Figura 9 (curva azul), pois foi forçado a não possuir condições iniciais. No Simulink, só é possível

definir as condições iniciais quando o modelo estimado pelo Identificador de Sistema for espaço de estados (MATHWORKS, 2017).

Conclusões

Inicialmente, a aplicação de filtros nos dados obtidos demonstrou ser uma etapa importante para posterior modelamento do sistema, uma vez que o uso do filtro analógico RC não consome processamento e, nesse estudo, já seria suficiente para filtragem do sinal. Entretanto, em processos mais suscetíveis a interferências, pode ser necessário combiná-lo com algum outro tipo de filtro para eliminar de forma satisfatória as interferências (como o filtro digital média móvel), em que encontrar um bom valor de “N” nesse caso é muitas vezes realizado através de algumas tentativas como a apresentada neste estudo.

Os resultados obtidos demonstram que devem ser realizadas algumas considerações no Identificador de Sistema do MATLAB utilizando como estimação a função de transferência. Na estimação levando em conta as condições iniciais do processo, o Identificador de Sistema considerou essas condições como parte da resposta, atingindo uma precisão de estimação acima de 95% apenas com um sistema de segunda ordem, não retornando um termo na função obtida que exprimisse aquelas condições iniciais. Ao forçar essas condições iniciais a serem nulas, um sistema de primeira ordem atingiu precisão superior ao primeiro caso.

Nas funções de transferência obtidas, o atraso no degrau de entrada não foi considerado, sendo necessário recorrer ao conhecimento teórico de uma propriedade da transformada de Laplace para ajustar a função de transferência de modo a representar o mais corretamente possível o processo analisado.

Podemos concluir que essa ferramenta de Identificação de Sistemas é um importante aliado quando o objetivo é obter o modelo de um sistema real, mas que o usuário deve estar atento a algumas propriedades inerentes à modelagem de sistemas para atingir o melhor resultado possível, demonstrando a importância do conhecimento teórico na aplicação prática.

Referências

AGUIRRE, Luis Antonio. **Introdução à Identificação de Sistemas – técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2004.

ANTUNES, Flávia. Uma nova abordagem para representações e identificações de classes de sistemas dinâmicos não-lineares. 2007. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

FILIPEFLOP. Sensor de gás MQ-3 álcool. Disponível em <<https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-gas-mq-3-alcool/>>. Acesso em dez. 2017.

MATHWORKS. Website. Disponível em <<https://www.mathworks.com/>>. Acesso em nov. 2017.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

PINHEIRO, Carla Isabel Costa. **Tutorial de Introdução ao Simulink (Version 7.6)**. Lisboa: Técnico Lisboa, 2012.

PIRES, Ricardo. Processamento digital de sinais: texto de suporte para aulas. 10 fev. – 02 jul. 2017. Notas de Aula.

SILVA, Rodolfo Pacheco. Introdução à Identificação de Sistemas utilizando o *System Identification Toolbox* do MATLAB em conjunto com o Arduino para o Laboratório de Controle Linear. 2015. 60 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado) – Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

SYSTEMS IDENTIFICATION BY TRANSFER FUNCTION USING MATLAB'S SYSTEM IDENTIFICATION TOOLBOX

ABSTRACT

In this paper is demonstrated the use of the MATLAB'S System Identification Toolbox in the estimate of a system based on the response of the alcohol sensor MQ-3. Systems Identification is an important tool to be used when a process is not easily modeled from its physical principles. The objective of the research is the analysis of the System Identification by one of the most common and introductory representations in the modeling study, the Transfer Function, and the evaluation of the importance in the use of filters in the pre-processing stage of the analyzed data. The application of two types of filters, the low pass filter and the moving average one, were evaluated individually and together. In the Transfer Function obtained, we analyzed the estimation accuracy with different system orders through the comparison of the model obtained with the real one and the Simulation in the MATLAB'S Simulink Toolbox. We could observe that some considerations of theoretical definitions should not be forgotten and the initial conditions of the process directly influence the accuracy of the obtained model.

Keywords: Systems Identification. Dynamic Modeling Systems. MATLAB System Identification Toolbox. Filters.

Envio: março/2018
Aceito para publicação: março/2018