

CONSTRUÇÃO DE UMA PLANTA DIDÁTICA DE BAIXO CUSTO E COM PARÂMETROS VARIANTES NO TEMPO PARA O ESTUDO DE MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO *ONLINE* DE SISTEMAS

Lucas de Carvalho Sodré – sodre209333@gmail.com

Carlos Eduardo Durans Nogueira – cednogueira@gmail.com

Antonio da Silva Silveira – asilveira@ufpa.br

Keiciane C. B. Vieira – vkeiciane@gmail.com

Venancio M. Pinto – venancio_pinto@hotmail.com

Universidade Federal do Pará, Laboratório de Controle e Sistemas (LACOS)

Rua Augusto Corrêa, 1 – Guamá

66075-110 – Belém – PA

Resumo: *Este trabalho tem como objetivo construir uma planta de baixo custo com parâmetros variáveis e modelar esse sistema conforme ele varia no tempo, desta forma facilitando o aprendizado de técnicas e conceitos da área de identificação de sistemas, visto que um dos pilares da Indústria 4.0 é acompanhar e analisar dados de um ou mais processos em tempo real garantindo maior assertividade na tomada de decisões. Portanto, foi desenvolvido um circuito elétrico RC de primeira ordem com parâmetros variantes no tempo e um algoritmo de estimação paramétrica com base no método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MQR). Este método é capaz de identificar as variações dos parâmetros de um sistema no momento em que elas ocorrem. Utilizou-se para aquisição de dados do circuito a plataforma Arduino e para implementação do algoritmo MQR o programa MATLAB permitindo que as técnicas e conceitos abordados nesse trabalho possam ser usados dentro de sala de aula proporcionando ao discente de engenharia explorar mais a área de identificação de sistemas.*

Palavras-chave: *Baixo Custo. Identificação de Sistemas. Mínimos Quadrados Recursivo. Variação de Parâmetros. Planta Didática.*

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de desempenhar atividades sem a interferência humana, usando somente a tecnologia, fez com que a indústria procurasse cada vez mais, formas de conectar sistemas e equipamentos, a fim de facilitar a personalização e automação de produtos, tornando a produção em massa mais flexível e eficiente caracterizando os conceitos da Indústria 4.0. Empresas que adotam esses conceitos em sua produção são denominadas de fábricas inteligentes, onde objetos, sensores e atuadores devem se comunicar e trocar informações constantemente (ESSS, 2017).

Um dos pilares da Indústria 4.0, que vem da integração da Internet das coisas (IoT) e dos sistemas ciberfísicos (CPS), é acompanhar e analisar dados em tempo real, saber todas as etapas do processo no momento em que elas acontecem, garantindo maior assertividade na tomada de decisões (ESSS, 2017; PISCHING, *et al.*, 2015). Desse modo, fez-se necessário a aplicação de técnicas de identificação de sistemas para supervisão, rastreamento de parâmetros variantes no tempo para controle adaptativo, filtragem, predição, processamento de sinais, detecção e diagnósticos dos processos envolvidos na produção. Entretanto, alguns métodos de identificação são mais adequados que outros para a aplicação em tempo real.

Portanto, é necessária uma formulação adequada de algoritmos a fim de obter parâmetros da planta *online*. Visto isso, o principal objetivo desse artigo é proporcionar experimentação da identificação de sistemas, utilizando a técnica de estimação paramétrica por Mínimos Quadrados Recursivo (MQR) em uma planta de primeira ordem com a variação de parâmetro ocasionada pela ação do usuário, assim introduzindo no meio acadêmico um experimento simples que põe em prática as técnicas de identificação *online* que são usadas em diversos processos industriais, já preparando os discentes de engenharia a enfrentar a nova era da tecnologia.

2 ABORDAGEM TEÓRICA

Será apresentada uma breve introdução a alguns dos princípios usados neste trabalho, como: representação de sistemas dinâmicos, identificação *online* via MQR, Teorema de Amostragem de Nyquist e discretização de sistemas.

2.1 Representação de sistemas dinâmicos

O processo de identificação de sistemas consiste na construção de modelos dinâmicos baseados em dados medidos. Esse modelo pode ser usado para: obter uma noção do comportamento dinâmico, predição, controle, estimação do estado, simulação da planta a ser identificada (BITTENCOURT, 2007). Logo, o modelo matemático para a representação de um circuito eletrônico de 1ª ordem, descrito no domínio da frequência, com uma entrada e uma saída, sem atraso é mostrado na Equação (1), em que K é o ganho do sistema e a é a frequência do polo em radianos por segundo (OGATA, 2011).

$$G(s) = \frac{K}{s + a} \quad (1)$$

2.2 Teorema de Nyquist e discretização do sistema

Devido ao Arduino utilizar conversores analógico-digital e digital-analógico na aquisição do sinal de saída e na geração do sinal de entrada, respectivamente, deve-se converter o modelo de primeira ordem para um equivalente discreto empregando a Transformada ZOH. O método da Transformada ZOH está descrito na Equação (2).

$$G(z) = (1 - z^{-1}) Z \left[\frac{G(s)}{s} \right] \quad (2)$$

$Z[.]$ denota a Transformada Z, tendo como resultado da discretização do sistema a Equação (3).

$$\frac{K}{s + a} \xrightarrow{\text{ZOH}} \frac{b_0}{z + a_1} \quad (3)$$

Quando o ganho da planta é aproximadamente 1, o valor dos parâmetros da função transferência no tempo discreto discreta, b_0 e a_1 , são definidos conforme mostrado nas equações (4) e (5), respectivamente.

$$b_0 = 1 - e^{-aT_s} \quad (4)$$

$$a_1 = -e^{-aT_s} \quad (5)$$

O T_s se refere ao período de amostragem utilizado para obter os dados necessários para a identificação *online*. Portanto, aplica-se o Teorema de Nyquist a fim de se determinar o período de amostragem máximo para a aquisição de dados. Esse teorema estabelece que a frequência de amostragem F_s deve ser ao menos duas vezes maior que a frequência da planta. Calcula-se a frequência mínima do protótipo da planta de primeira ordem utilizada conforme a Equação (6).

$$2a = 2\pi F_s \quad (6)$$

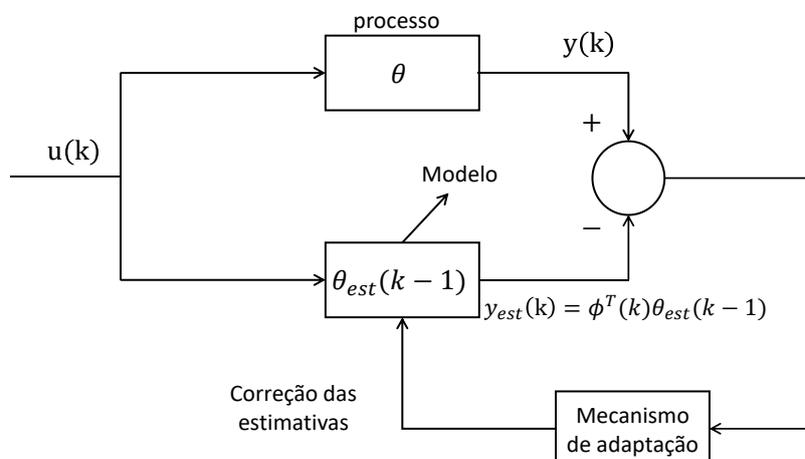
$$\frac{1}{F_s} = T_s \quad (7)$$

2.3 Identificação *online* via Mínimos Quadrados Recursivo

A Identificação *online* tem os parâmetros calculados de forma recursiva à medida que um novo conjunto de dados está disponível. Assim, a cada novo conjunto de dados os parâmetros são corrigidos. Este processo pode ser feito rapidamente à medida que o sistema muda. Esta metodologia é chamada de identificação em tempo real. O algoritmo mais popular para este tipo de abordagem é o dos MQR (BRANDOLT, 2002).

A identificação por MQR possibilita que o modelo do sistema seja atualizado a cada período de amostragem percebendo as variações na dinâmica do processo (COELHO e COELHO, 2016). Sendo assim, é importante visualizar o procedimento de estimação recursivo em termos de um modelo paralelo conforme se mostra na Figura 1.

Figura 1 - Blocos de uma tarefa de identificação online.



Fonte: Os autores.

Para o estado inicial da identificação por MQR é necessário estabelecer a matriz de covariância P inicial a qual usa como base n_a que é o número de regressores presentes no vetor coluna ϕ , como na Equação (8).

$$P = I_{n_a \times n_a} \quad (8)$$

Outro componente importante para a identificação é o vetor de regressores (ϕ) no qual k representa o tempo discreto com o intervalo de T_s entre suas amostras, $y(k)$ é o vetor saída do sistema e $u(k)$ é o vetor entrada do sistema, como se mostra na Equação (9).

$$\phi^T(k) = [-y(k-1) \quad \dots \quad -y(k-n_a) \quad u(k-1) \quad \dots \quad u(k-n_a)] \quad (9)$$

Em posse desses dados calcula-se o ganho do estimador MQR, L , com o fator de esquecimento, λ , que tem como função dar mais importância as novas aquisições, de acordo com a Equação (10).

$$L_{n_a \times 1}(k) = \frac{(P(k-1)\phi(k))}{(\lambda + \phi^T(k)P(k-1)\phi(k))} \quad (10)$$

Com o ganho L atualizado, os parâmetros estimados θ_{est} podem assumir novos valores, conforme a Equação (11).

$$\theta_{est}(k) = \theta_{est}(k-1) + L(k)\{y(k) - \phi^T(k)\theta_{est}(k-1)\} \quad (11)$$

Por fim, atualiza-se a Matriz de Covariância para o próximo período de amostragem seguindo o processo de estimação otimizado a cada aquisição. A atualização da matriz P está representada na Equação (12).

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} ([I_{n_a \times n_a} - L\phi^T(k)]P(k-1)) \quad (12)$$

3 METODOLOGIA

Para a elaboração do experimento foram utilizados os seguintes materiais:

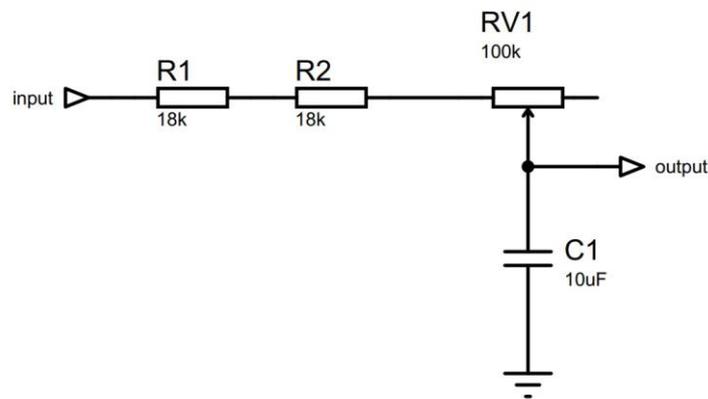
- 2 resistores de 18 k Ohms
- 1 potenciômetro de 100 k Ohms
- 1 capacitor 10 nF
- 1 protoboard
- Jumpers

- 1 Arduino UNO
- 1 Computador com *MATLAB* versão R2017b

3.1 Construção da planta

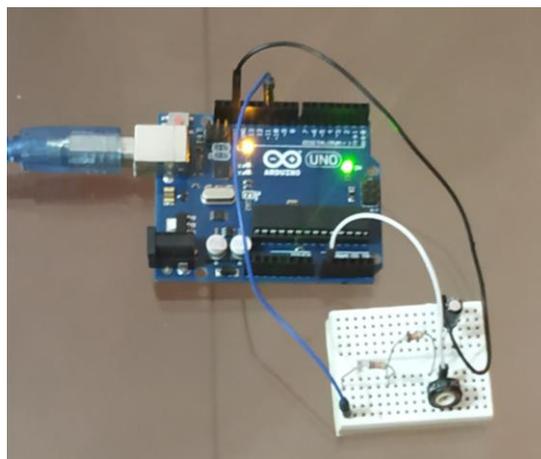
O primeiro passo é a construção da planta com o parâmetro variável. Para isso foram efetuadas as seguintes ligações: no Arduino, ligou-se um *jumper* no pino 11 o qual é a entrada do sistema. Da mesma forma ligou-se um *jumper* no pino 14 e no GND que são a saída e o terra do sistema, respectivamente. Do mesmo modo, a entrada foi conectada ao resistor de 18 k ohms o qual foi conectado com os demais resistores. O arranjo em que eles se encontram é em série. Depois disso foi criado um nó em que estão conectados tanto a saída do sistema e o capacitor. Por fim, a outra ponta do capacitor conectou-se ao terra. Na Figura 2 e Figura 3 está o esquemático do circuito e a imagem dele em funcionamento, respectivamente.

Figura 2 – Esquemático do circuito.



Fonte: Os autores.

Figura 3 – Imagem do circuito.



Fonte: Fotografia dos autores.

Visto que o sistema é o de primeira ordem a constante de tempo corresponde ao seguinte valor apresentado na Equação (14).

$$\frac{K}{s+a} = \frac{K}{s+1/RC} \quad (13)$$

$$1/RC = a \quad (14)$$

Em que R é o valor da resistência equivalente da associação dos resistores e o potenciômetro em série, logo sua resistência pode variar de 36 kohms a 136 kohms. Já C corresponde ao valor do capacitor utilizado no experimento.

Visto isso, a frequência estabelecida pelo Teorema de Nyquist para essa planta é de 0,8913Hz, porém sabendo que esse sistema pode variar (pela alteração do valor do potenciômetro ocasionada pelo usuário durante o experimento) é necessária uma frequência mínima maior, sendo assim o T_s é igual a 0,05 segundos.

3.2 Aquisição

Para a aquisição dos sinais de entrada e saída da planta, foi utilizado o Arduino UNO, uma placa de prototipagem *open source*, logo os projetos nela criados são de domínio público. A programação do Arduino é feita através de um ambiente de desenvolvimento próprio onde utiliza-se de uma linguagem de programação também própria, semelhante ao C/C++. O Arduino consegue se comunicar com o computador através da porta USB. Essa comunicação se dá através do Monitor Serial do Ambiente Integrado de Desenvolvimento do Arduino (IDE) (ARDUINO UNO, 2018). Devido ao Arduino ter que se comunicar com o *MATLAB* se fez o uso das funções presentes na biblioteca *DaqDuino*, na qual pode ser baixada no *site* da *Mathworks*.

3.3 Algoritmo MQR

No *software MATLAB* está presente o Estimador MQR que utiliza os dados discretos provenientes da aquisição. A parte inicial do código é a criação do vetor de entrada que somado ao padrão de onda *pseudorandom binary sequence* (PRBS) proporciona um “agito” constante na entrada do circuito fazendo com que o algoritmo de estimação possa perceber variações na planta a cada momento durante o experimento. Adiante é estabelecido o tempo de amostragem de 0,05 segundos, o fator de esquecimento de 0,99, e os valores iniciais da modelagem que são a criação da matriz de covariância, os parâmetros discretos estimados iniciais.

Em seguida, foi posto o *loop* de aquisição de dados que utiliza as funções previstas pelo *DaqDuino* e a identificação simultânea, a função *daqduino_read* lê a saída do circuito e armazena no vetor $y(k)$, e a função *daqduino_write* estabelece valor da entrada e entre essas duas funções é atualizado a matriz de covariância e os ganhos dos parâmetros permitindo uma otimização dos valores de cada parâmetro estimado e assim reduzindo o erro de estimação.

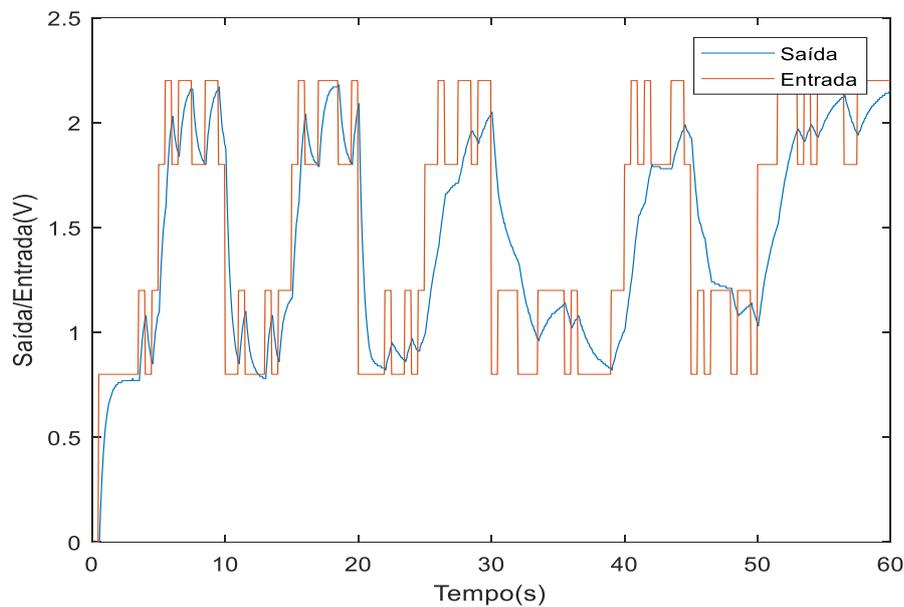
Foi aplicado o Estimador MQR proposto durante um 1 minuto. Nesse intervalo o algoritmo percebeu a variação da constante de tempo ocasionada pela mudança da resistência do potenciômetro. Dessa forma foram retornados dados que podem ser analisados afim de melhorar a compreensão sobre o algoritmo de identificação *online*.

4 RESULTADOS E CONCLUSÃO

Dos dados retornados é possível criar gráficos e índices de validação acerca da identificação. A Figura 4 exhibe a relação da entrada com a saída ao longo tempo. Logo após, na Figura 5, temos a evolução dos parâmetros discretos. Percebe-se que após os 20 segundos de

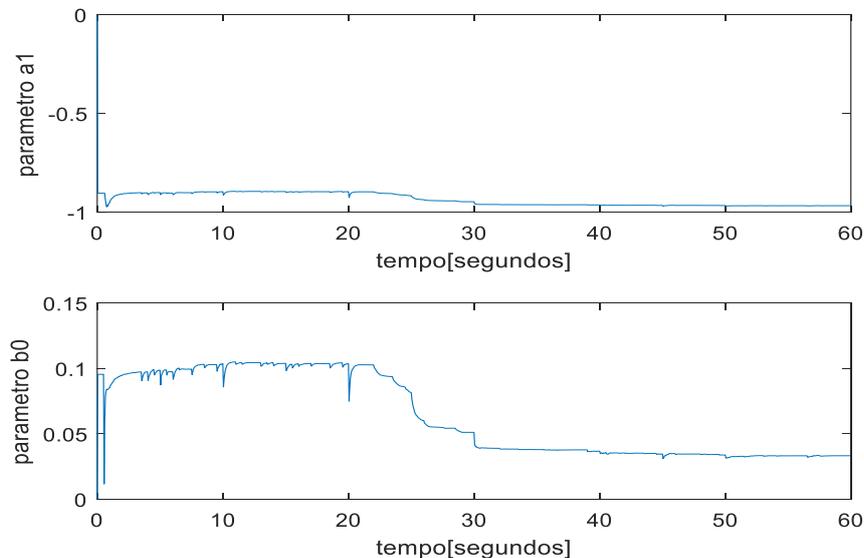
experimento foi ocasionada a mudança do valor do potenciômetro dando a ele mais resistência e tendo como resultado a alteração dos valores de a_1 e b_0 tornando-os menores.

Figura 4 – Relação entrada e saída.



Fonte: Os autores.

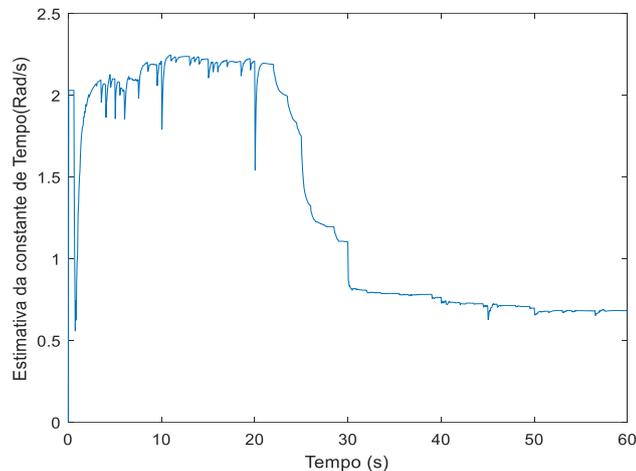
Figura 5 – Evolução dos parâmetros discretos.



Fonte: Os autores.

O aumento da resistência provoca a diminuição da constante a , como está determinado na Equação (14). Com os dados retornados do programa é possível analisar esse decaimento ao longo do tempo conforme a Figura 6.

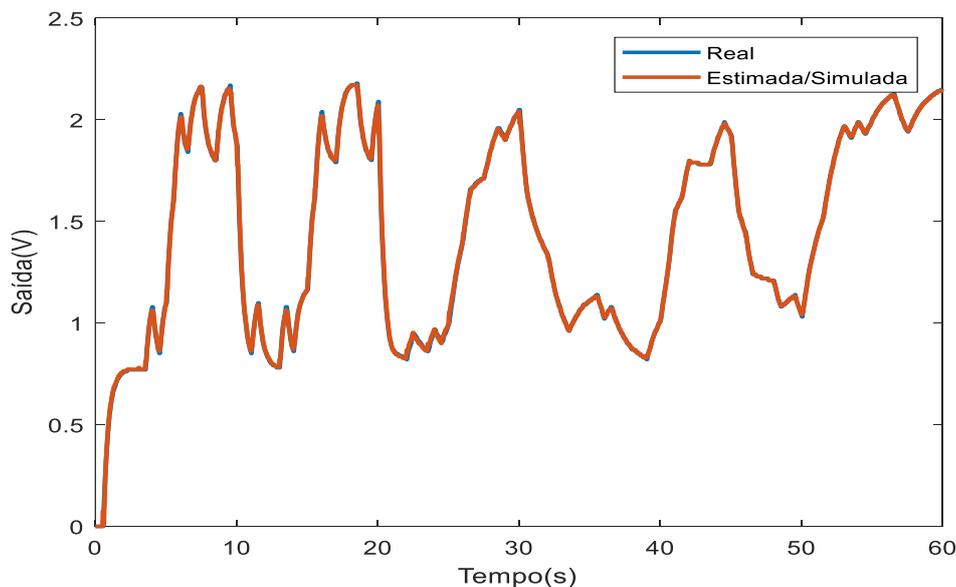
Figura 6 – Estimativa da constante de tempo.



Fonte: Os autores.

Por fim, o gráfico da Figura 7 é a relação entre a saída real e saída estimada pelos parâmetros provenientes do algoritmo MQR. Devido à alta frequência de amostragem e à perturbação na entrada (PRBS) o programa atualiza a todo momento os parâmetros fazendo com que a saída estimada seja praticamente igual à da saída real da planta. Porém é necessário um índice de desempenho para que mostre o quão certo está a identificação. Logo utilizou-se o Coeficiente de Correlação Múltipla para o qual quanto mais perto o seu valor de 1 melhor é a estimação do processo identificado (COELHO e COELHO, 2016). O valor do coeficiente do modelo estimado é 0,9994.

Figura 7 – Relação da saída real com a saída estimada.



Fonte: Os autores.

A identificação por MQR proposta capta praticamente todas as mudanças de parâmetros da planta. Com isso o Coeficiente de Correlação Múltipla se aproximou demais de 1 provando que a estimação dos valores da saída feita pelo algoritmo foi perto da saída real do sistema durante todo tempo de experimento e que a o processo de identificação foi bem aplicado.

Percebe-se que a planta e o algoritmo MQR utilizados no artigo proporciona ao discente a experimentação da identificação de sistemas em tempo real, e assim, abordando técnicas muito uteis no cenário de Indústria 4.0, pelo fato de acompanhar *online* as evoluções dos parâmetros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O experimento submetido facilita o aprendizado de técnicas que são usadas em processos presentes na Indústria 4.0, e a junção do baixo custo dos componentes para confecção da planta e o fácil acesso à plataforma Arduino permite que essas técnicas possam ser aplicadas dentro de sala de aula.

O algoritmo MQR apresentado proporciona ao discente de engenharia explorar a área de identificação de sistemas, dando a ele a oportunidade de alterar diversos parâmetros da planta, como: o tempo de amostragem, o fator de esquecimento, o vetor de entrada e a ordem do modelo.

REFERÊNCIAS

ADEBAYO, Adelaja O; **Industry 4.0: The Fourth Industrial Revolution And How It Relates To The Application Of Internet Of Things(IoT)**. 2019. South Ural State University, Chelyabinsk, 2019.

ARDUINO UNO. **Arduino UNO overview**. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. Acesso em: 13 jan. 2019.

ASTROM, Karl Johan; WITTENMARK, Bjorn. **Computer-controlled systems: theory and design**. New York: Dover Publications.2011.

BITTENCOURT, Marcelo C. **Identificação de sistemas dinâmicos lineares – métodos paramétricos e não paramétricos**. Disponível em: http://bdm.unb.br/bitstream/10483/988/1/2007_MarceloCastroBittencourt.pdf. Acesso em 09 mar. 2019.

COELHO, Antonio Augusto R; COELHO, Leandro dos Santos. **Identificação de sistemas dinâmicos lineares**. Florianópolis: Editora UFSC. 2016.

ESSS. **Os Pilares da Indústria 4.0**. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/os-pilares-da-industria-4-0/>. Acesso em: 18 fev. 2019.

OGATA, Katsujko. **Engenharia de controle moderno**. 5ª edição. São Paulo: Pearson, 2011.

PARSOPOULOS, Konstantinos E. **Particle swarm optimization and intelligence: advances and applications: advances and applications**. New York: IGI Global. 2010.

PISCHING, Marcos A. **Service Composition in the Cloud-Based Manufacturing focused on the Industry 4.0.** 2015. Pp. 65-72. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2015.

VILLANUEVA, Juan M. M. **Introdução a Identificação de Sistemas.** Disponível em:
<http://www.cear.ufpb.br/juan/wp-content/uploads/2017/08/Aula-2-Introdu%C3%A7%C3%A3o-a-Identifica%C3%A7%C3%A3o-de-Sistemas.pdf>. Acesso em 23 jan. 2019.

CONSTRUCTION OF A LOW-COST DIDACTIC PLANT WITH VARIABLE PARAMETERS IN TIME FOR THE STUDY OF ONLINE SYSTEM IDENTIFICATION METHODS

Abstract: *This work aims to construct a low-cost plant with variable parameters and to model this system as it varies in time, thus facilitating the learning of techniques and concepts of the area of identification of systems, since One of the pillars of the 4.0 Industry is to monitor and analyses data from one or more processes in real time ensuring greater assertiveness in decision-making. Therefore, was develop a first-order electronic circuit with variant parameters in time and an algorithm of parametric estimation based on the of Recursive Least Squares method (RLS). This method can identify variations of the parameters of a system at the time they happen. The Arduino platform was used to acquire data from the circuit and for the implementation of the RLS algorithm the MATLAB program allowing the techniques and concepts addressed in this work to be used within the classroom providing Engineering students further exploring the systems identification area.*

Key-words: *Low cost. Systems Identification. Recursive Least Squares. Variation of Parameters. Didactic Plant.*