

DESENVOLVIMENTO E IDENTIFICAÇÃO DE UMA PLANTA MIMO DE DUAS ENTRADAS E DUAS SAÍDAS PARA ENSINO DE SISTEMAS DE CONTROLE

Carlos Eduardo Durans Nogueira – cednogueira@gmail.com

Antonio da Silva Silveira – asilveira@ufpa.br

Nelson Nayoshi Nakamoto Yamaguti – nelson.yamaguti19@gmail.com

Lucas de Carvalho Sodré – sodre209333@gmail.com

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

Rua Augusto Corrêa, 1 – Guamá

66075-110 – Belém – PA

Resumo: O atual cenário no que diz respeito ao ensino de sistemas de controle deve enfatizar o desenvolvimento experimental de sistemas multivariáveis para estar em conformidade com grande parte das técnicas e dos sistemas reais dos dias de hoje. Neste artigo, um circuito eletrônico MIMO (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas) foi desenvolvido com o objetivo didático de experimentação deste tipo de planta no cenário de ensino superior em engenharia. Foram realizados testes de respostas do sistema a estímulos e identificação da planta via mínimos quadrados em espaço de estados. A aquisição de dados e implementação dos algoritmos foram feitos utilizando-se Arduino e Matlab.

Palavras-chave: Sistemas de Controle. MIMO. Mínimos Quadrados. Identificação. Espaço de Estados.

1 INTRODUÇÃO

Na indústria 4.0, com a evolução da tecnologia, novos métodos computacionais e eletrônicos são desenvolvidos constantemente, fazendo com que a robótica seja otimizada rapidamente. Na Hannover Messe, feira de tecnologia e logística realizada em Hannover, na Alemanha, foi verificado o próximo nível de robôs que podem colaborar com o humano. Segundo Selim Gökbas, chefe de pesquisa e desenvolvimento da IBF Automation: “[...] esses androides possuem múltiplas sensibilidades. Através de sensores, eles podem mensurar forças. Por meio de câmeras, eles são capazes de visualizar e parar o seu deslocamento antes de colidir com uma pessoa ou um objeto. Através da inteligência computacional, eles são capazes de detectar emoções e nível de estresse do homem”. Para que o robô tenha tantos recursos, é necessário que o sistema possua vários dados a serem detectados e transmitidos, o conhecimento fundamental para isso, é o estudo de sistemas com Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (MIMO), que é o foco deste trabalho.

Devido à complexidade de sistemas MIMO modernos, há um déficit no ensino deles nas universidades brasileiras para a categoria de Engenharias IV (classificado pela CAPES), fazendo com que os Engenheiros de Controle e Automação, e áreas afins, tenham dificuldade de adequação a este cenário quando inseridos em problemas reais e práticos na pesquisa e na indústria. “É essencial reduzir a complexidade das expressões matemáticas, bem como recorrer aos computadores para a maioria dos processamentos tediosos necessários na análise”

(OGATA, 2010). Sob este ponto de vista, o principal objetivo deste artigo é proporcionar a experimentação do processo MIMO com duas entradas e duas saídas.

Para que os engenheiros possam projetar como o emprego dos recursos eletromecânicos deve ser implementado na indústria, realizam-se identificações do sistema, dentre elas, usa-se uma com base no estimador de Mínimos Quadrados (MQ). O método de estimação por MQ consiste em minimizar o quadrado das diferenças entre os valores observados de uma amostra e seus respectivos valores esperados. A estimação por MQ possui dois métodos: Não-Recursivo (offline) e Recursivo (online). O estimador empregado nesse artigo é o Não Recursivo.

No contexto da globalização 4.0, é difícil supor a não integração sistemática de dinâmicas de processos reais. Acompanhando esta perspectiva, o estudante egresso de sistemas de controle deve, ao finalizar sua formação acadêmica, estar ciente de suas competências no tratamento de sistemas multivariáveis com acoplamento de dinâmicas. Ao se controlar um drone remotamente, por exemplo, o estudante precisa entender a influência de um dos propulsores na dinâmica dos outros propulsores e, por conseguinte, na captação de sinais dos sensores, os quais podem sofrer atraso de comunicação da rede *wireless* que o mesmo utiliza. Ou seja, para se controlar processos complexos como quadrimotores, ou até mesmo processos industriais MIMO, é imprescindível o treinamento experimental com plantas MIMO ainda na academia.

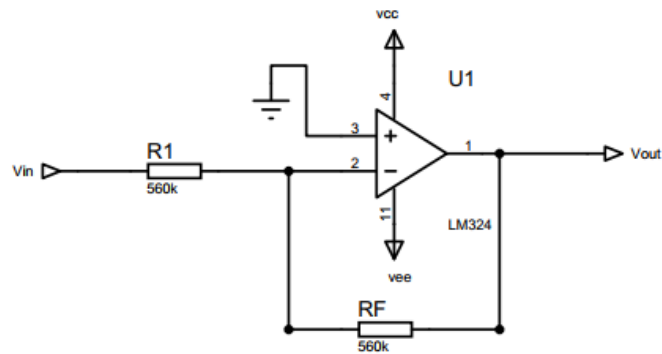
O principal objetivo deste artigo é fornecer aos estudantes de controle de sistemas habilidades práticas e teóricas no que diz respeito a identificação e projeto de sistemas MIMO com dinâmicas acopladas no contexto acadêmico de nível superior (tanto na pós-graduação, como na graduação). Logo, os próximos tópicos são alocados neste artigo para que o leitor possa reproduzir o experimento e adquirir conhecimentos mais avançados sobre sistemas de controle, em conformidade com demandas acadêmicas e industriais atuais.

2 DESCRIÇÃO DA PLANTA

A planta didática descrita neste artigo foi desenvolvida pelos próprios autores com o objetivo inicial de testar experimentalmente algoritmos de controle em sistemas MIMO com dinâmicas acopladas como garantia de funcionamento para a implementação de controladores em plantas MIMO mais complexas, como em drones quadrimotores. O uso da planta didática está sendo estendido, atualmente, para o uso em disciplinas de pós-graduação cuja linha de pesquisa é em controle de sistemas (Teoria de Sistemas Lineares e Controle Digital, por exemplo). Posteriormente, pretende-se usá-la em disciplinas da graduação da categoria Engenharias IV.

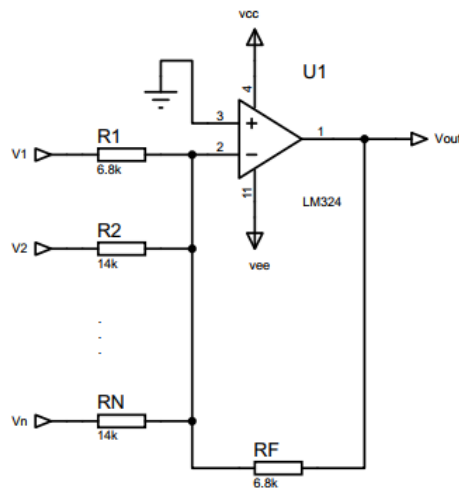
O processo eletrônico descrito neste artigo é composto por estágios de configurações de amplificadores operacionais. O Amplificador Inversor mostrado na Figura 1 tem a função de inverter o sinal e alterar o ganho da tensão elétrica como descrito na Equação (1). O Amplificador Somador mostrado na Equação (2) e na Figura 2 somará de forma ponderada os sinais de tensão; e o Amplificador Integrador, mostrado na Equação (3) e na Figura 3, acrescentará dinâmica de polos ao processo. Os tipos de amplificadores supracitados podem ser consultados na maioria das literaturas de circuitos eletrônicos ativos.

Figura 1. Circuito Inversor.



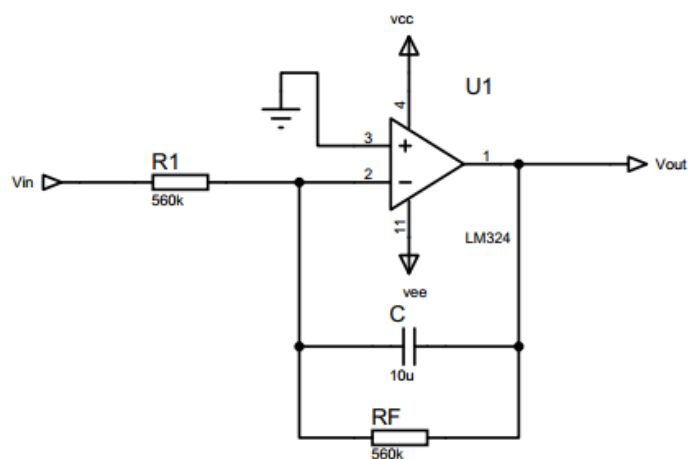
Fonte: Autoria própria.

Figura 2. Circuito Somador.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3. Circuito Integrador.



Fonte: Autoria própria.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\left(\frac{R_f}{R_1}\right) \quad (1)$$

$$V_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_1}V_1 + \frac{R_f}{R_2}V_2 + \dots + \frac{R_f}{R_n}V_n\right) \quad (2)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{1}{1 + sR_fC} \left(\frac{R_f}{R_1}\right) \quad (3)$$

$$y_1(s) = \frac{\frac{(u_1(s) + \alpha_b y_2)}{R_{c2}R_{c1}C^2}}{(u_1 + \beta y_2)K_1}}{\frac{2}{R_{c2}R_{c1}C^2} + \frac{(R_{c2} + R_{c1})}{R_{c2}R_{c1}C} s + s^2} \quad (4)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{a_2} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{a_1}$

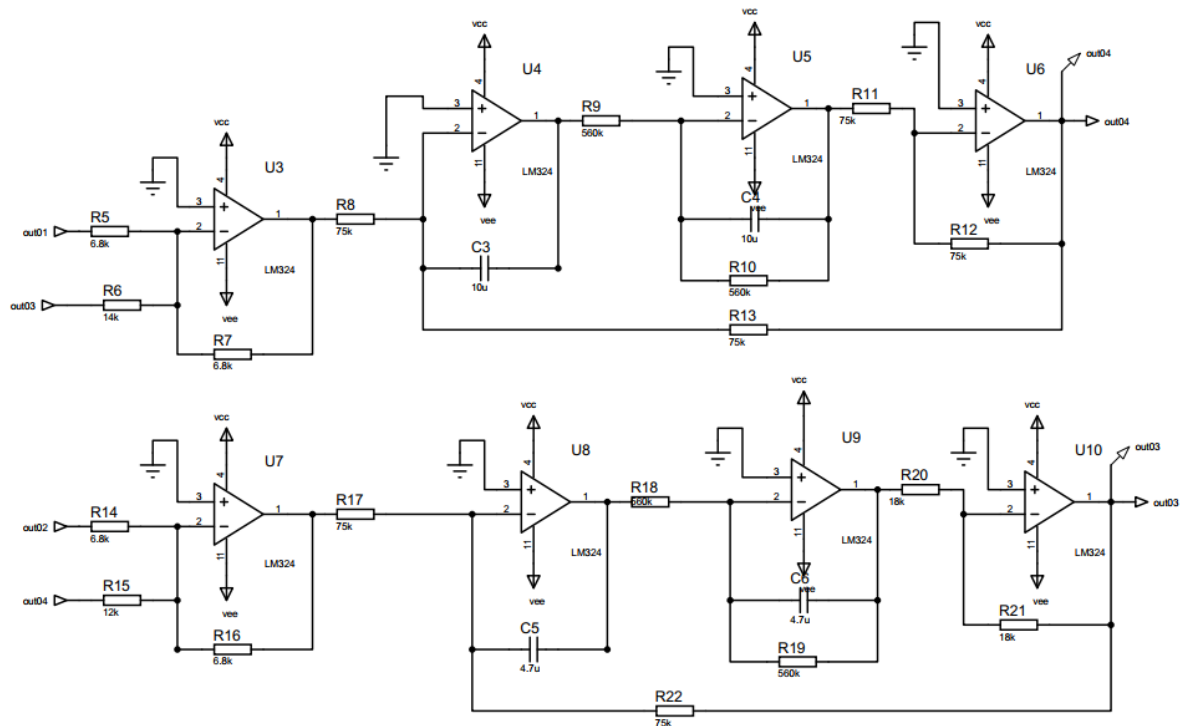
$$y_2(s) = \frac{\frac{(u_2(s) + \alpha_g y_1)}{R_{c2}C_2R_{c1}C_1}}{(u_2 + \gamma y_1)K_2}}{\frac{2}{R_{c2}C_2R_{c1}C_1} + \frac{(R_{c2}C_2 + R_{c1}C_1)}{R_{c2}C_2R_{c1}C_1} s + s^2} \quad (5)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{l_2} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{l_1}$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix}}_{\dot{X}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -a_1 & -a_2 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \gamma & l_2 & l_1 \end{pmatrix}}_{A_c} \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}}_X + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ K_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_2 \end{pmatrix}}_{B_c} \underbrace{\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}}_U \quad (6)$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}}_Y = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}}_C \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}}_X \quad (7)$$

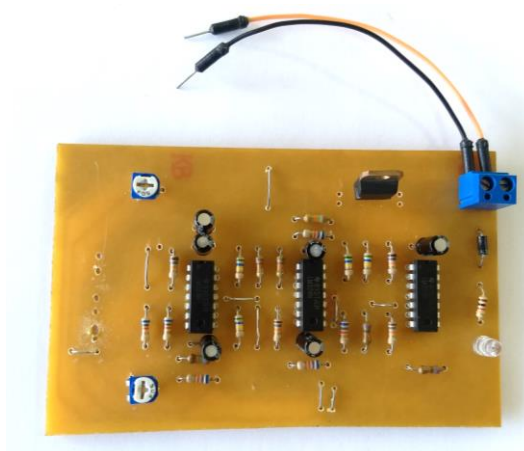
Figura 4. Diagrama Esquemático do circuito MIMO 2x2.



Fonte: Autoria própria.

Ao se analisar a estrutura de diagramas na Figura 4, pode-se determinar as funções de transferência contínuas do sistema nas Equações (4) e (5), que, conseqüentemente, podem ser representados em espaço de estados na Equação (6) e (7). O circuito eletrônico do processo real desenvolvido é exposto na Figura 5.

Figura 5. Circuito MIMO 2x2 real.



Fonte: Autoria própria.

3 IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO

Admitindo-se que as variáveis de estados podem ser medidas e que o sistema é do tipo Linear e Invariante no Tempo, desenvolve-se o algoritmo de Mínimos Quadrados não recursivo no Espaço de Estados (MQEE) MIMO (BRANDOLT, 2002).

Seja o modelo discreto em espaço de estados da planta descrito pelas Equações (8) e (9), onde $k = [0,1,2,3, \dots]$ é o instante de tempo discreto.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k-1) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(k-1) \\ x_2(k-1) \\ \vdots \\ x_n(k-1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{np} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1(k-1) \\ u_2(k-1) \\ \vdots \\ u_p(k-1) \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \\ \vdots \\ y_q(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{q1} & \dots & c_{qn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} \theta_1^T \\ \vdots \\ \theta_n^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_{11} & \dots & a_{1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} & a_{n1} & \dots & a_{np} \end{pmatrix} \quad (10)$$

O objetivo do MQEE é - além de fornecer um modelo de resposta para as saídas do sistema - realizar uma estimativa dos estados do processo, como evidenciado na Figura 7. A estimação dos estados x_2 e x_4 é realizada por meio de uma aproximação do tipo *backward*. Ou seja, utiliza-se uma amostra da saída em dado instante de tempo discreto, subtrai-se da amostra passada e divide-se pelo período de amostragem, como descrevem as Equações (11) e (12).

$$x_2(k) = \frac{x_1(k) - x_1(k-1)}{T_s} \quad (11)$$

$$x_4(k) = \frac{x_3(k) - x_3(k-1)}{T_s} \quad (12)$$

$$\phi^T(k) = [x_1(k-1) \dots x_n(k-1) \ u_1(k-1) \dots u_p(k-1)]_{1 \times (n+p)}$$

$$\Phi(k) = \begin{bmatrix} \phi^T(0) \\ \vdots \\ \phi^T(N) \end{bmatrix}_{N \times (n+p)} \quad (13)$$

$$\mathbf{P} = [(\Phi^T \Phi)^{-1}]_{(n+p) \times (n+p)} \quad (14)$$

Sendo θ o vetor de parâmetros estimados exibido na Equação (10), ϕ o vetor de regressores mostrado na Equação (13) e \mathbf{P} a matriz de covariância do MQEE apresentado na Equação (14).

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{P} \Phi^T X_1 \\ \vdots \\ \mathbf{P} \Phi^T X_n \end{bmatrix}^T = \mathbf{P} \Phi^T [X_1 \dots X_n]$$

$$\mathbf{X} = [X_1 \dots X_n]$$

A matriz θ , que fornece os elementos das matrizes \mathbf{A} e \mathbf{B} , é então obtida pela Equação (15).

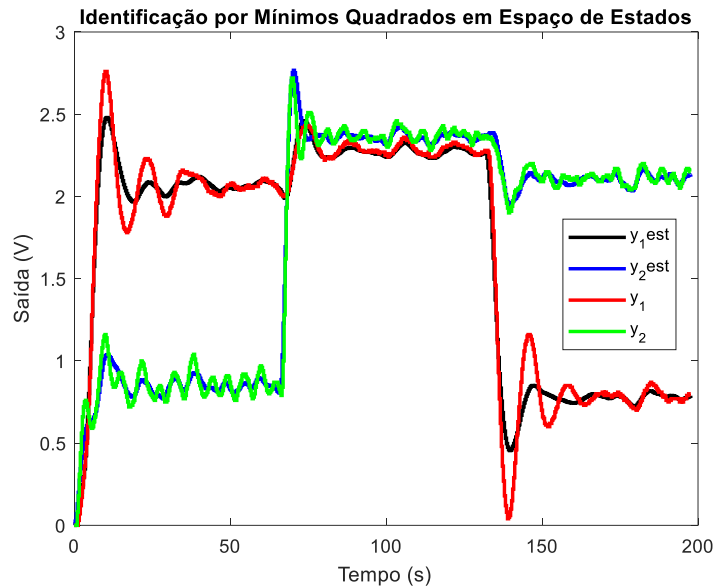
$$\Theta_{(n+p) \times n} = \mathbf{P}_{(n+p) \times (n+p)} \Phi_{(n+p) \times N}^T \mathbf{X}_{N \times n} \quad (15)$$

4 RESULTADOS

A Figura 6 exibe as saídas estimadas em comparação com as saídas reais do sistema, sendo ambas estimuladas pelos mesmos sinais de entrada. Percebe-se a discrepância na capacidade de estimação entre as duas dinâmicas da planta, pois a saída y_1 estimada é visivelmente mais aproximada da saída y_1 real quando comparada as saídas referentes a y_2 . Esta discrepância é devido ao tempo de amostragem frente a frequência natural das dinâmicas, pois o algoritmo de mínimos quadrados perde precisão na modelagem quando o sistema está superamostrado, o que pode ser melhorado com aprimoramentos no algoritmo do MQEE.

Ao se processar o algoritmo MQEE no Matlab, utilizando dados de respostas do sistema a sucessivos degraus contaminados com PRBS (*Pseudo Random Binary Signal*), o sistema discreto em espaço de estados foi identificado, sendo as matrizes para o sistema discreto mostradas nas Equações (16), (17) e (18).

Figura 6. Identificação por MQEE.



Fonte: Autoria própria.

$$A = \begin{pmatrix} 0.9359 & 0.2428 & 0.0132 & -0.0076 \\ -0.2136 & 0.8093 & 0.0440 & -0.0252 \\ 0.0018 & -0.0015 & 0.9712 & 0.1965 \\ 0.0060 & -0.0049 & -0.0960 & 0.6551 \end{pmatrix} \quad (16)$$

A

$$B = \begin{pmatrix} 0.0628 & 0.0002 \\ 0.2093 & 0.0007 \\ 0.0020 & 0.0274 \\ 0.0067 & 0.0913 \end{pmatrix} \quad (17)$$

B

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

C

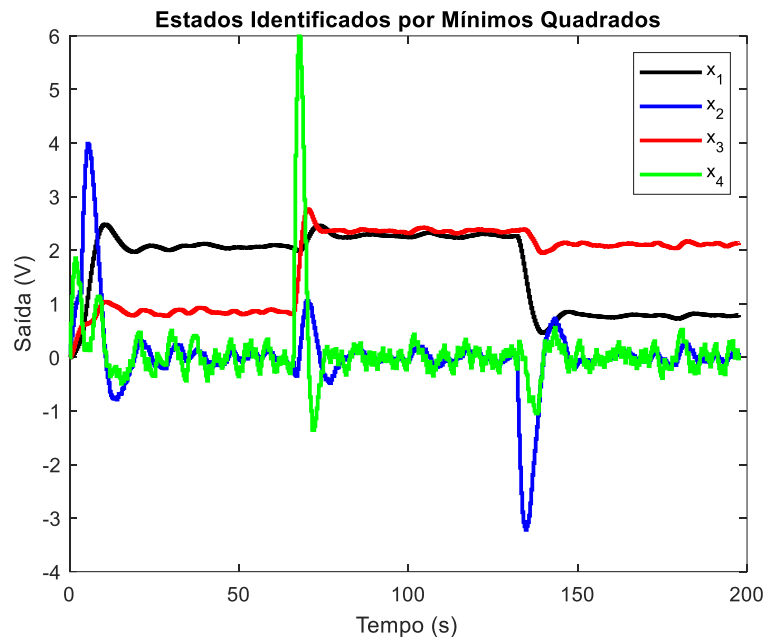
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^N [y(k) - \hat{y}(k)]^2}{\sum_{k=1}^N [y(k) - \bar{y}]^2} \quad (19)$$

Tabela 1 – Resultados dos Índices de Correlação.

Saída	Índice de Correlação
y_1	0.9816
y_2	0.9934

Fonte: Autoria própria.

Figura 7. Estados estimados por MQEE.



Fonte: Autoria própria.

Para testar a eficiência do algoritmo MQEE utilizou-se o Índice de Correlação Múltipla descrito na Equação (19). Onde $y(k)$ é a saída real, $\hat{y}(k)$ é a saída estimada e \bar{y} é a média das N amostras da experimentação.

Quando o valor de R^2 é igual a um, indica uma exata adequação do modelo para os dados medidos do processo. O valor de R^2 entre 0.8 e 1 pode ser considerado suficiente para muitas aplicações práticas (COELHO, 2016).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho cumpriu o objetivo de fornecer ao estudante de sistemas de controle, e áreas afins, ferramentas para identificação de sistemas MIMO em espaço de estados por meio de experimentação prática, o que culmina num significativo avanço frente a paradigmas no ensino de controle no Brasil.

Pretende-se, futuramente, ampliar a extensão de uso da planta para alunos de graduação em Institutos Federais, com possíveis acréscimos de funcionalidades, como: inserção de ruído, atraso de transporte e comunicação *wireless*, tornando o aprendizado do estudante cada vez mais dinâmico e completo. Além disso

Uma vez feita a identificação, a tarefa de controle experimental é o próximo passo a ser dado, ficando este como possibilidade para trabalhos futuros.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

BRANDOLT, Henry Galañena. **Simulação de Escoamento em Dutos por Caracterização de Eventos**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

COELHO, Antônio A. R.; COELHO, Leandro S. **Identificação de sistemas dinâmicos lineares**. 2º Edição, Santa Catarina: Editora UFSC, 2016.

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

DEVELOPMENT AND IDENTIFICATION OF A MIMO PLANT OF TWO INPUTS AND TWO OUTPUTS FOR TEACHING CONTROL SYSTEMS

Abstract: *The current scenario of the teaching of control systems should emphasize the development of multivariate systems experimentally to conform to most techniques and real systems. In this paper, a MIMO (Multiple Inputs and Multiple Outputs) electronic circuit was developed with the didactic objective of experimenting this type of plant in the scenario of higher education in engineering. Tests of system to responses to stimulus and plant identification by least squares in state space were done. Data acquisition and algorithm implementation were done using Arduino and Matlab.*

Keywords: *Control Systems. MIMO. Least Squares. Identification. Space State.*