

# PLATAFORMA MULTIDISCIPLINAR APLICADA AO ENSINO DE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Carlos Renato Meneghetti,<sup>1</sup> Celso Eduardo Vieira Oliveira,<sup>2</sup> Galesandro Henrique Capovilla<sup>3</sup>

## RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de apresentar a aplicação de uma plataforma computacional multidisciplinar voltada para o ensino de identificação de sistemas. A interdisciplinaridade permite ao aluno desenvolver diversas habilidades em atividades específicas e de aplicação prática. Nesse contexto, o estudo de identificação de sistemas com o uso de atividades práticas incrementa a relação ensino-aprendizagem. O aparato desenvolvido utiliza conhecimentos de eletrônica, linguagens de programação, protocolos de comunicação e microcontroladores. O sistema a ser identificado nessa plataforma consiste em um modelo térmico de aquecimento por resistências elétricas. Foram utilizadas duas aproximações, um modelo de primeira ordem com tempo morto e um modelo de segunda ordem sobreamortecido. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, com erros da ordem de 0,68°C.

Palavras-Chave: Modelo matemático; Identificação de sistemas; Primeira ordem; Segunda ordem.

## ABSTRACT

### MULTIDISCIPLINARY PLATFORM APPLIED TO SYSTEMS IDENTIFICATION TEACHING

This study aims to present the application of a multidisciplinary computational platform focused on the education of systems identification. The interdisciplinary approach allows students to develop various skills in specific activities and practical application. In this context, the system identification study with practical activities enhances the teaching-learning relationship. The apparatus developed using knowledge of electronics, programming languages, communication protocols and microcontrollers. The system to be identified on this platform consists of a thermal model of heat by electric resistances. Two approaches, a first order model with dead time and a second order model were used. The results were satisfactory, with errors in order of 0.68 °C.

**Keywords:** Mathematical model; System identification; First order; Second order.

<sup>1</sup> Professor, Mestre, Centro Universitário Salesiano de São Paulo, Unisal; carlos.meneghetti@sj.unisal.br

<sup>2</sup> Professor, Especialista, Centro Universitário Salesiano de São Paulo, Unisal; celso.oliveira@sj.unisal.br

<sup>3</sup> Professor, Mestre, Centro Universitário Salesiano de São Paulo, Unisal; galesandro.capovilla@sj.unisal.br

## INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, com a evolução da eletrônica, aliada ao baixo custo dos componentes e computadores, ficou bem mais acessível a elaboração de aulas práticas para o ensino de disciplinas relacionadas à engenharia. Partindo dessa observação, disciplinas anteriormente só ministradas de forma teórica ganham mais significado quando acompanhadas de experimentos práticos. O experimento prático vem ao encontro das teorias pedagógicas baseadas no construtivismo. Como resultado disso, percebe-se que o aprendizado se torna mais eficiente e o aluno mais motivado, pois consegue compreender o que lhe foi passado na teoria.

Outro ganho para o aluno é o aumento de conhecimento interdisciplinar, pois, em geral, o *kit* experimental é composto por mais componentes do que o aprendido nas disciplinas teóricas, levando-o a pesquisar novos conhecimentos. Essa abertura de horizontes se mostra muito importante, pois, no mercado de trabalho atual, o conhecimento deve ser amplo e não focado em apenas um determinado tópico.

Assim, plataformas para estudos de estratégias de controle agilizam o processo de investigação de sistemas de controle, conforme indicado por Meneghetti *et al.*, 2013, Meneghetti *et al.*, 2010, Tizzei *et al.*, 2011.

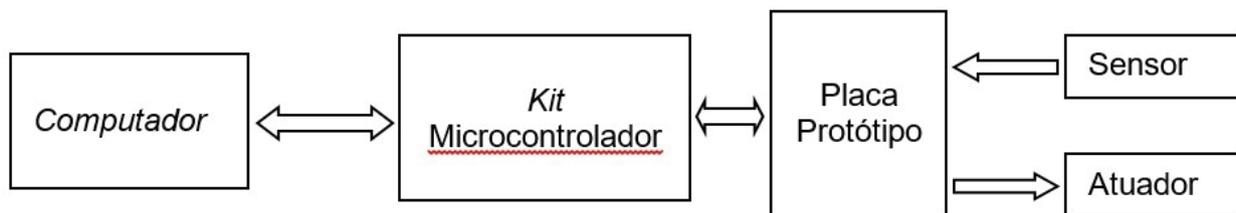
Este artigo discorre sobre o desenvolvimento e aplicação de um *kit* didático para atividades experimentais de controle de temperatura e a sua aplicação em identificação de sistemas.

Desenvolveu-se uma placa de potência que irá gerar temperatura através do aquecimento de resistências. Junto a essas resistências, deve ser colocado um sensor de temperatura. No outro extremo desse *kit*, será desenvolvida uma aplicação em LabVIEW para a coleta desses dados, desenvolvimento e ajustes de métodos de controle, e geração do sinal para determinação do aquecimento das resistências. Entre a aplicação e a placa de sensores e atuadores, utilizou-se um microcontrolador com a função de aquisição de dados e geração de *PWM* (*pulse width modulation*, ou seja, modulação por largura de pulsos) para as resistências.

## MATERIAL E MÉTODOS

O *hardware* utilizado aplica um *kit* didático para microcontrolador da empresa Proxsys. Desenvolveu-se uma placa protótipo contendo o sistema dos sensores, amplificadores e etapa de potência para o atuador. A Figura 1, a seguir, representa o diagrama, em blocos, do sistema desenvolvido.

Figura 1: Diagrama em blocos do sistema.



O *kit* do microcontrolador faz a interconexão entre o computador e a placa protótipo do sistema, utilizando um protocolo desenvolvido sobre a interface de comunicação RS-232, disponível no *kit*. No computador, os dados são arquivados em planilhas para facilitar a posterior análise dos resultados.

Neste trabalho, foram utilizadas duas possíveis aproximações matemáticas para sistemas térmicos: primeira ordem com tempo morto e segunda ordem sobreamortecido.

Aprea e Renno (2001, 2009) e Ding (2006) relataram que é possível aproximar sistemas térmicos

a um sistema de primeira ordem com tempo morto, conforme indicado na Equação 1, a seguir. Hua *et al.* (2007), Meneghetti *et al.* (2013) também utilizaram uma aproximação de primeira ordem com tempo morto e obtiveram resultados satisfatórios.

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

onde:

G(s) é a função de transferência em Laplace;

s é a variável de Laplace;

K é o ganho estático;

L é o tempo morto;

$\tau$  é a constante de tempo.

Para a identificação dos parâmetros do sistema de primeira ordem, utilizou-se o método da tangente descrito por Visioli (2006) e Johnson e Moradi (2005).

Na aproximação de segunda ordem sobreamortecida, aplicou-se a função de transferência (G(s)) representada na Equação 2, discutida por Seborg *et al.* (1989), Visioli (2006) e Teixeira *et al.* (2007). Essa função representa um sistema com dois polos reais.

$$G(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} e^{-Ls} \quad (2)$$

$$\tau_1 > \tau_2 > 0$$

$$L > 0$$

onde:

K = ganho estático;

L = tempo morto;

$\tau_1$  e  $\tau_2$  = constantes de tempo a serem estimadas.

Para a identificação dos parâmetros do sistema de segunda ordem da Equação 2, aplicou-se o método de Harriot, conforme descrito por Seborg *et al.* (1989); Visioli (2006) e Johnson e Moradi (2005), sendo que o ganho estático e as constantes de tempo devem ser obtidas, respectivamente, pelas Equações 3, 4 e 5, a seguir:

$$K = \frac{y_f - y_0}{u_f - u_0} \quad (3)$$

$$\tau_1 = \left( \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} \right)_{\text{para } y^*} \times \left( \frac{t_{73} - t_0}{1,3} \right) \quad (4)$$

$$\tau_2 = \left\{ 1 - \left( \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} \right)_{\text{para } y^*} \right\} \times \left( \frac{t_{73} - t_0}{1,3} \right) \quad (5)$$

onde:

$y_f$  = valor final da saída;

$y_0$  = valor inicial da saída;

$u_f$  = valor final da entrada;

$u_0$  = valor inicial da entrada;

$t_0$  = tempo em que ocorreu o degrau de entrada;

$t_{73}$  = tempo em que a saída atinge 73% de  $y_f - y_0$ .

A razão  $\left( \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} \right)_{\text{para } y^*}$ , que é utilizada nas Equações 3 e 4, será obtida graficamente, sendo:

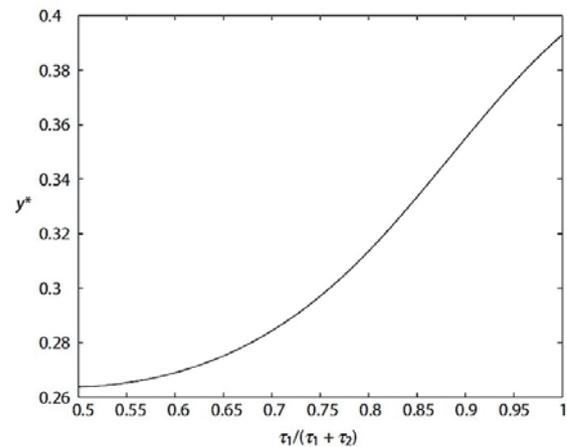
$$y^* = \frac{y' - y_0}{y_f + y_0} \quad (6)$$

Sendo que  $y'$ , da Equação 6, corresponde ao valor da saída no instante de tempo  $t'$ , calculado da seguinte forma:

$$t' = t_0 + \frac{t_{73} - t_0}{2,6} \quad (7)$$

Calculado o valor de  $y^*$ , extrai-se do Gráfico 1 o valor da relação  $\left( \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} \right)_{\text{para } y^*}$ .

**Gráfico 1: Relação entre  $y^*$  e  $\left( \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} \right)_{\text{para } y^*}$ . (Johnson e Moradi, 2005).**



Para a identificação das funções de transferência do sistema desenvolvido, utilizou-se o método determinístico, conforme discutido por Aguirre (2007), que também afirma ser necessário, para a validação do modelo, um conjunto de dados diferentes dos utilizados na identificação do sistema.

Para o cálculo do erro, adotou-se o desvio padrão, conforme a Equação 8.

$$D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_0^n (Vm - Ve)^2} \tag{8}$$

onde:

$D$  é o desvio padrão;

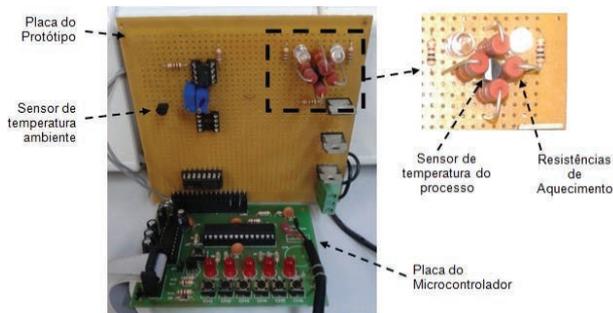
$n$  é o número de amostras;

$(Vm - Ve)$  corresponde ao erro entre o modelo  $(Vm)$  e o experimento  $(Ve)$ .

## RESULTADOS

A Figura 2 apresenta a foto do sistema desenvolvido, conforme diagrama de blocos da Figura 1. Pode-se notar o *kit* didático acoplado à placa protótipo, que contém o sensor e o atuador do sistema.

Figura 2: Protótipo do sistema de controle.

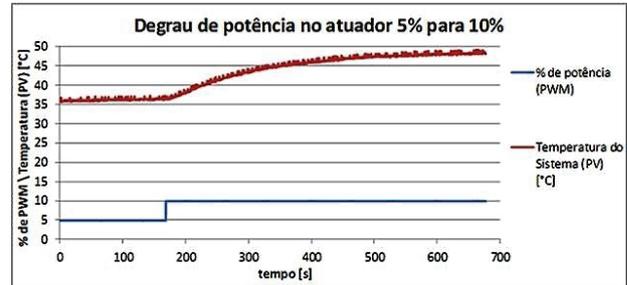


Utilizou-se como sensor de temperatura um circuito integrado LM35, que tem sua grandeza medida pelo conversor analógico digital do microcontrolador. O atuador consiste em um conjunto de quatro resistências elétricas localizadas próximas ao sensor, sendo que a potência entregue é controlada utilizando Modulação por Largura de Pulso (*PWM*), também gerada pela placa do microcontrolador. As variáveis de entrada e saída são gerenciadas pelo computador, via protocolo dedicado, desenvolvido para essa plataforma.

## Identificação do sistema

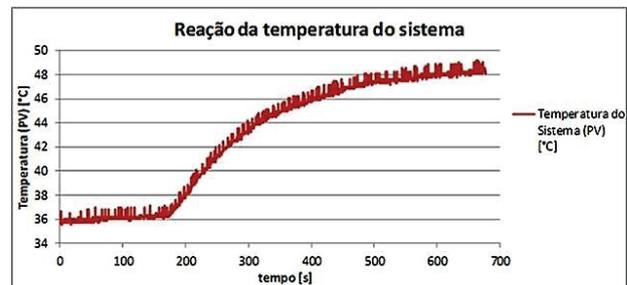
Para a identificação do sistema, aplicou-se um degrau na potência de entrada do atuador, de 5% para 10%, de *Duty Cycle* do *PWM* de controle. A aquisição de dados para o sistema resultou no Gráfico 2, que apresenta o degrau do atuador e o comportamento da temperatura do sistema.

Gráfico 2: Degrau de 5% para 10% no atuador e resposta do PV.



O Gráfico 3 apresenta com mais detalhe os dados de temperatura do sistema (PV). Com base nesse gráfico, foi possível extrair os coeficientes do modelo da Equação 1.

Gráfico 3: Reação da temperatura ao degrau de 5% de potência no *PWM*.



Sendo:

$$K = 2,57$$

$$\tau = 157,9$$

$$L = 8$$

constituindo a função de transferência de primeira ordem e tempo morto, apresentada pela Equação 9.

$$G(s) = \frac{2,57 e^{-8s}}{157,9s+1} \tag{9}$$

Para a identificação do sistema de segunda ordem sobreamortecido, como representado na Equação 2, utilizou-se o mesmo conjunto de dados, po-

rém, aplicando-se o método de Harriot. Obteve-se, então, os seguintes parâmetros e a Equação 10:

$$K = 2,4$$

$$\tau_1 = 116,97$$

$$\tau_2 = 15,951$$

$$L = 8$$

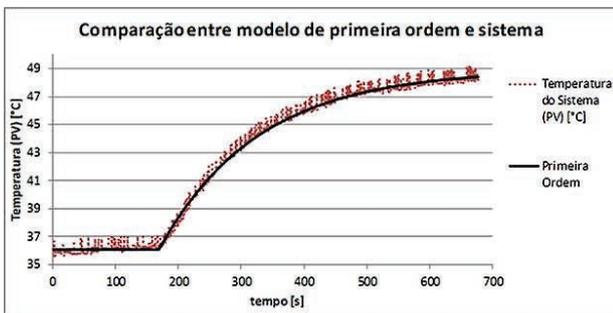
$$G(s) =$$

$$= \frac{2,4}{(116,97s+1)(15,951s+1)} e^{8s} \quad (10)$$

## Validação dos modelos

Para a validação da função de transferência de primeira ordem com tempo morto, implementou-se no *Simulink* um modelo, submetendo-o ao mesmo degrau de entrada do sistema real. A resposta do modelo foi registrada em planilha e agrupada no mesmo gráfico gerado para a identificação. O Gráfico 4 representa a sobreposição do modelo ao sistema real utilizado para a identificação.

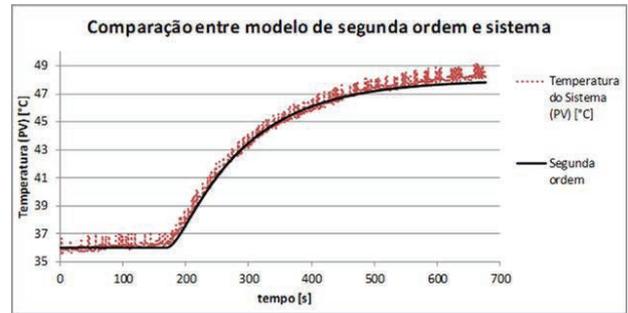
**Gráfico 4: Comparação entre resultado do modelo de primeira ordem e o sistema.**



O desvio padrão entre o real e o modelo de primeira ordem com tempo morto foi de 0,28°C, resultado semelhante ao encontrado na revisão bibliográfica (HUA *et al.*, 2007; MENEGHETTI *et al.*, 2013).

Da mesma forma, para a validação da função de transferência de segunda ordem, implementou-se também um modelo matemático, submetendo-o ao mesmo degrau de entrada do sistema real. A resposta do modelo também foi registrada em planilha e agrupada no mesmo gráfico gerado para a identificação. O Gráfico 5 representa a sobreposição do modelo ao sistema real utilizado para a identificação.

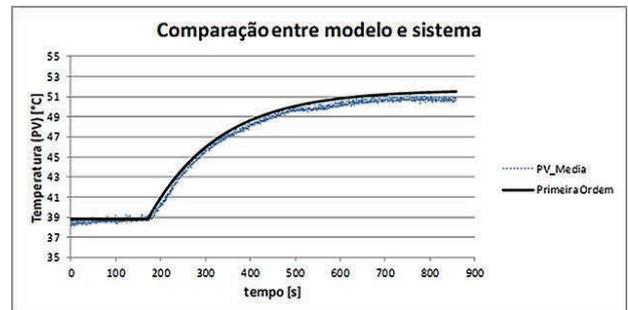
**Gráfico 5: Comparação entre resultado do modelo de segunda ordem e o sistema.**



O desvio padrão obtido entre o modelo matemático de segunda ordem e o sistema real foi de 0,36°C, semelhante ao encontrado na revisão bibliográfica.

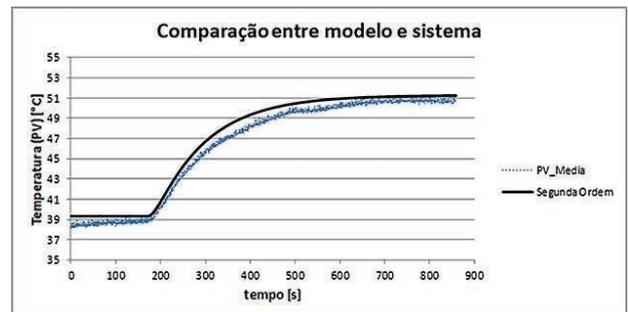
Conforme sugere a revisão bibliográfica para o processo de validação dos modelos matemáticos, realizaram-se mais três experimentos semelhantes aos anteriores, calculando-se a média entre eles para uma nova comparação com os modelos matemáticos identificados. A comparação entre o novo experimento e o modelo de primeira ordem pode ser visualizada no Gráfico 6.

**Gráfico 6: Comparação entre resultado do modelo de primeira ordem e o sistema.**



Do mesmo modo, elaborou-se o Gráfico 7, que representa a comparação entre o novo experimento e o modelo de segunda ordem identificado.

**Gráfico 7: Comparação entre modelo de segunda ordem e o sistema.**



Para esse novo conjunto de dados de validação, o desvio padrão para o modelo de primeira ordem foi 0,80°C, e para o modelo de segunda ordem foi 0,68°C, valores condizentes com o encontrado na revisão bibliográfica (TEIXEIRA *et al.*, 2007; MENEGHETTI *et al.*, 2013; TIZZEI *et al.*, 2011).

## CONCLUSÕES

O dispositivo desenvolvido possibilitou a integração de conhecimentos nas áreas de eletricidade, eletrônica, programação de microcontroladores e microcomputadores. Possibilitou, também, desenvolver o conhecimento de conceitos básicos para controle e identificação de sistemas, tais como: sensores, atuadores e controladores.

De forma objetiva, a plataforma desenvolvida agilizou o processo experimental acadêmico utilizado para o ensino de identificação de sistemas.

A identificação dos sistemas envolvidos foi considerada satisfatória, pois os resultados obtidos convergem para o encontrado nas revisões bibliográficas.

Essa plataforma foi utilizada como aparato de demonstração durante as aulas de identificação de sistemas, proporcionando aos alunos uma visão mais prática sobre esse tópico. Os modelos matemáticos encontrados também são utilizados para aulas de teoria de controle. Como trabalho futuro, pretende-se que cada aluno tenha sua própria plataforma, podendo comparar e explorar mais resultados.

## REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas**. 3. ed. Editora UFMG. Belo Horizonte, 2007.
- VISIOLI, A. **Practical PID control**. London: Springer, 2006.
- JOHNSON, M. A.; MORADI, M. H. **PID control**. London: Springer, 2005.
- SEBORG, D. E. *et al.* **Process dynamics and control**. Wiley Series in Chemical Engineering, 1989.
- APREA, C.; RENNO C. Experimental analysis of a transfer function for an air cooled evaporator, *Applied Thermal Engineering*, v. 21, p. 481-493, 2001.
- APREA, C.; RENNO C. Experimental model of a variable capacity compressor. *International Journal of Energy Research*, v. 33, p. 29-37, 2009.

DING, G. Simulation technology for refrigeration and air conditioning appliances. *Chinese Science Bulletin*, v. 51, n. 16, p. 1.913-1.928, 2006.

HUA, L.; JEONG, S. K.; YOON, J. I.; YOU, S. S. An empirical model for independent control of variable speed refrigeration system. *Applied Thermal Engineering*, v. 28, p. 1.918-1.924, 2007.

MENEGHETTI, C. R. *et al.* A mathematical model for the cold storage of agricultural products. *Revista Ciência Agronômica*, v. 44, n. 2, p. 286-293, 2013.

MENEGHETTI, C. R. *et al.* Sistemas para estudos de estratégias de controle aplicadas em câmaras frias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39, 2010, Vitória - ES. Anais... Vitória - Es: Sbea, 2010. CD-ROM.

TIZZEI, A. *et al.* System for studies of control strategies applied in refrigerated chambers. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 5, p. 868-878, 2011.

TEIXEIRA, B. O. S.; JOTA, F. G.; TEIXEIRA, M. H. Modelagem, controle e otimização do processo dos fornos de reaquecimento de placas. *Sba Controle & Automação [online]*. v. 18, n. 1, p. 67-93, 2007.