

## **SIMULAÇÃO DA RESPOSTA DE VAZÃO DE PLANTA PILOTO DE SISTEMA CIP UTILIZANDO IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS**

RODRIGO SISLIAN<sup>1</sup>, JÚLIO CÉSAR DE SOUZA BRUSAFERRO<sup>2</sup> e RUBENS GEDRAITE<sup>2</sup>

<sup>3</sup>Dr. Prof. Ass., IFSP, Guarulhos - SP, rodrigo@ifsp.edu.br;

<sup>2</sup>Tecnólogo - Pesquisador FEQ, UNICAMP, Campinas – SP, juliobrusaferro@gmail.com;

<sup>3</sup>Dr. Prof. Ass., FEQ, UFU, Uberlândia - MG, rgedraite@ufu.br.

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
15 a 17 de setembro de 2021

**RESUMO:** Neste trabalho é feito um estudo comparativo de modelos matemáticos da resposta de velocidade de escoamento (vazão) em um protótipo para variações da potência da bomba, com o objetivo de representar a variável adequadamente e com o menor erro possível, possibilitando estudos e simulações de condições de interesse visando a otimização do processo. Com base nos resultados experimentais obtidos em um protótipo, onde foram aplicadas variações aleatórias na potência da bomba, coletando a resposta do sensor de vazão, foi realizada a identificação desta resposta utilizando o Toolbox System Identification do Software Matlab<sup>®</sup>, sendo estimados modelos do tipo ARX e do tipo OE, ambos de ordem 4 e 6. O modelo discreto Output Error (OE) de ordem 6 obtido representou a resposta do sistema com menor erro, comparativamente aos demais considerados neste estudo. Este modelo possibilita um estudo com maior grau de precisão, por exemplo, do consumo de água e energia do processo CIP em protótipos similares, podendo ser estendido para implementação em sistemas industriais. Além disto, estas simulações possibilitam o estudo de diversas condições operacionais do processo sem o consumo de insumos, representando economia e redução do impacto ambiental.

**PALAVRAS-CHAVE:** limpeza CIP, identificação de sistemas, redução do impacto ambiental, consumo de água, consumo de energia.

### **SIMULATION OF A CIP SYSTEM PILOT PLANT FLOW RESPONSE USING SYSTEM IDENTIFICATION**

**ABSTRACT:** In this work, a comparative study of flow velocity response mathematical models in a prototype for pump power variations is carried out, with the objective of representing this variable and with the least possible error, enabling studies and simulations of conditions of interest to optimize the process. Based on the experimental results obtained in a prototype, where random variations in the pump power were applied, collecting the response of the flow sensor, this response was identified using the Toolbox System Identification of the Matlab<sup>®</sup> Software, estimating models of the ARX type and the OE type, both of order 4 and 6. The discrete Output Error (OE) model of order 6 obtained represents the system response with less error, when compared to the others considered in this study. This model allows a study with a higher degree of precision, for example, of the water and energy consumption of the CIP process in similar prototypes, which can be extended to implementation in industrial systems. In addition, these simulations allow the study of various operational conditions of the process without the consumption of inputs, representing savings and a reduction in environmental impact.

**KEYWORDS:** CIP cleaning, system identification, environmental impact reduction, water consumption, energy consumption.

### **INTRODUÇÃO**

O consumo de alimentos processados é uma tendência crescente. Considerando o aumento da demanda por produtos alimentícios processados, também existe a preocupação com a contaminação

por agentes que podem ser prejudiciais à saúde e interferir na qualidade dos produtos acabados. Assim, a limpeza do equipamento é um pré-requisito para garantir a produção de alimentos seguros e, portanto, a operação de limpeza deve ser feita regularmente. (Bode et al., 2007; Niamsuwan et al., 2011; Campdepadrós, et al., 2012; Goode et al., 2013).

Um dos processos mais utilizados para a higienização de equipamentos é a limpeza *Clean-In-Place* (CIP), pois a mesma permite que o procedimento seja realizado sem que seja necessária a desmontagem dos equipamentos. (Fryer et al, 2006).

A quantidade de água gasta nos processos de limpeza, em especial nos processos *Clean-In-Place* (CIP), é crescente em decorrência da intensificação da produção de alimentos. Entretanto, este fato tradicionalmente implica na utilização, por parte da comunidade industrial, de maior quantidade de insumos do que aqueles que seriam necessários e tecnicamente suficientes para atender aos requisitos técnicos estabelecidos nas leis aplicáveis (Brasileiro, 2020).

Um dos parâmetros envolvidos nestes processos que representa grande importância com vistas ao consumo de água e insumos do processo é a vazão de escoamento. Este está relacionado com a ação cisalhante proporcionada pela solução de detergente e água de enxágue sobre a superfície, o que facilita a remoção de resíduos.

Existem vários métodos para obtenção de um modelo que representa uma resposta do processo, cada um com propriedades diferentes. A técnica para obtenção de modelos a partir de dados coletados experimentalmente é chamada de identificação de sistemas.

A identificação pode ser realizada empregando curvas de resposta do processo quando excitados por sinais de entrada do tipo degrau, impulso ou senoidal e, partir dessas curvas, podendo-se extrair modelos aproximados, de baixa ordem, que descrevam o comportamento dinâmico do processo (Seborg et al., 2011).

Há também as estruturas de modelos discretos padronizados, definidas por equações diferenciais, dentre os quais destacam-se as estruturas Auto-regressiva com entradas exógenas (ARX), Auto-regressiva com média móvel e entradas exógenas (ARMAX), Erro na saída (OE) e Box-Jenkins (BJ).

Neste trabalho é feito um estudo comparativo da identificação de modelos matemáticos da resposta de velocidade de escoamento (vazão) em um protótipo para variações da potência da bomba, com o objetivo de representar adequadamente e com o menor erro possível esta variável, possibilitando estudos e simulações de condições de interesse visando a otimização do processo.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os valores experimentais de resposta da vazão para variações na potência da bomba foram coletados na unidade experimental apresentada na Figura 1.

Figura 1. Bancada experimental utilizada (Fonte: Silva, 2018)

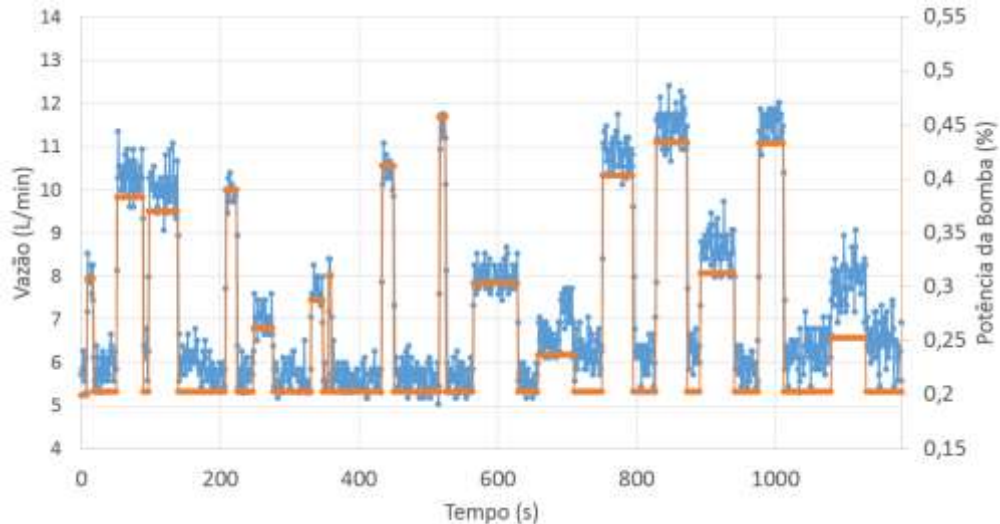


Silva (2018) instrumentou o protótipo com um sensor de vazão do tipo turbina (modelo YF-S201), sendo este sinal enviado ao sistema eletrônico de coleta de dados. As variações na vazão foram excitadas por meio de um sinal elétrico enviado ao inversor de frequência que atuou na bomba centrífuga para manipulação da vazão. O autor realizou a calibração desse instrumento, relacionando o número de rotações com o fluxo de matéria passante e, assim, determinou o modelo paramétrico na forma de função de transferência de primeira ordem com tempo de atraso (FOPDT) para representar a vazão em função de variações aleatórias na potência da bomba.

Com base nos mesmos resultados experimentais, onde foram aplicadas variações aleatórias na potência da bomba, coletando a resposta do sensor de vazão por meio do sistema eletrônico de coleta de dados, foi realizada a identificação desta resposta utilizando o *Toolbox System Identification* do Software Matlab®.

Os dados para identificação (Figura 2) foram importados ao sistema, sendo os modelos desenvolvidos do tipo SISO (*single-input - single-output*) onde a entrada é a potência da bomba e a saída é a vazão.

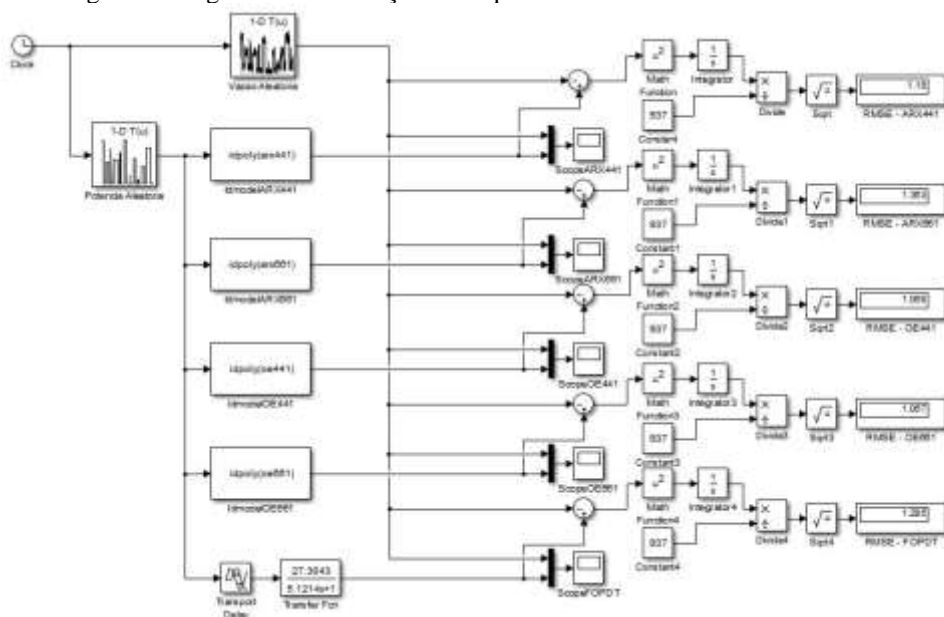
Figura 2. Resposta da Vazão para Variações na Potência da Bomba (Identificação)



Foram estimados modelos do tipo ARX e do tipo OE, ambos de ordens 4 e 6, utilizando a ferramenta. Os modelos do tipo ARMAX e Box-Jenkins não representaram adequadamente o comportamento do sistema e, assim, não serão apresentados neste trabalho.

Para a validação, foi desenvolvido um diagrama de blocos utilizando a ferramenta Simulink® do Software Matlab®, objetivando, além de validar os modelos obtidos (com dados experimentais diferentes dos utilizados para a identificação), efetuar o estudo comparativo entre o modelo identificado por Silva (2018) e os modelos preditos ARX e OE. O diagrama de simulação desenvolvido é apresentado na Figura 3, onde é possível observar a inserção dos dados através de uma *Lookup Table*, a inclusão dos modelos identificados, e o cálculo do erro médio quadrático entre os dados de validação e os dados preditos por cada um dos modelos.

Figura 3. Diagrama de Simulação da resposta dos modelos identificados



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações executadas na ferramenta Simulink<sup>®</sup> do Software Matlab<sup>®</sup> foram baseadas no modelo aproximado apresentado por Silva (2018), com adaptações no ganho do processo (Equação 1), e nas estruturas dos modelos identificados utilizando o Toolbox *System Identification* do Software Matlab<sup>®</sup>. Os modelos SISO ARX podem ser escritos explicitamente por  $A(q).y(k) = B(q).u(k) + e(k)$  e os modelos SISO OE por  $y(k) = [B(q)/F(q)].u(k) + e(k)$ , sendo a representação de  $A(q)$  e  $B(q)$  apresentadas nas equações 2 e 3 para os modelos ARX de ordem 4 e ordem 6, respectivamente, e  $B(q)$  e  $F(q)$  nas equações 4 e 5, para os modelos OE de ordem 4 e ordem 6, respectivamente.

$$G(s) = \frac{27,3043}{1 + 5,1214 s} \cdot e^{-0,3422 \cdot s} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} A(z) &= 1 - 0,3055 \cdot z^{-1} - 0,2384 \cdot z^{-2} - 0,221 \cdot z^{-3} - 0,1012 \cdot z^{-4} \\ B(z) &= 18,37 \cdot z^{-1} - 2,819 \cdot z^{-2} - 5,745 z^{-3} - 6,148 \cdot z^{-4} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} A(z) &= 1 - 0,236 \cdot z^{-1} - 0,164 \cdot z^{-2} - 0,164 \cdot z^{-3} - 0,129 \cdot z^{-4} - 0,202 \cdot z^{-5} - 0,03 \cdot z^{-6} \\ B(z) &= 18,89 \cdot z^{-1} - 1,459 \cdot z^{-2} - 4,191 \cdot z^{-3} - 4,078 \cdot z^{-4} - 2,685 \cdot z^{-5} - 4,484 \cdot z^{-6} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} B(z) &= 21,53 \cdot z^{-1} - 31,3 \cdot z^{-2} - 26,81 \cdot z^{-3} - 16,7 \cdot z^{-4} \\ F(z) &= 1 - 1,593 \cdot z^{-1} - 1,49 \cdot z^{-2} - 1,017 z^{-3} - 0,1312 \cdot z^{-4} \end{aligned} \quad (4)$$

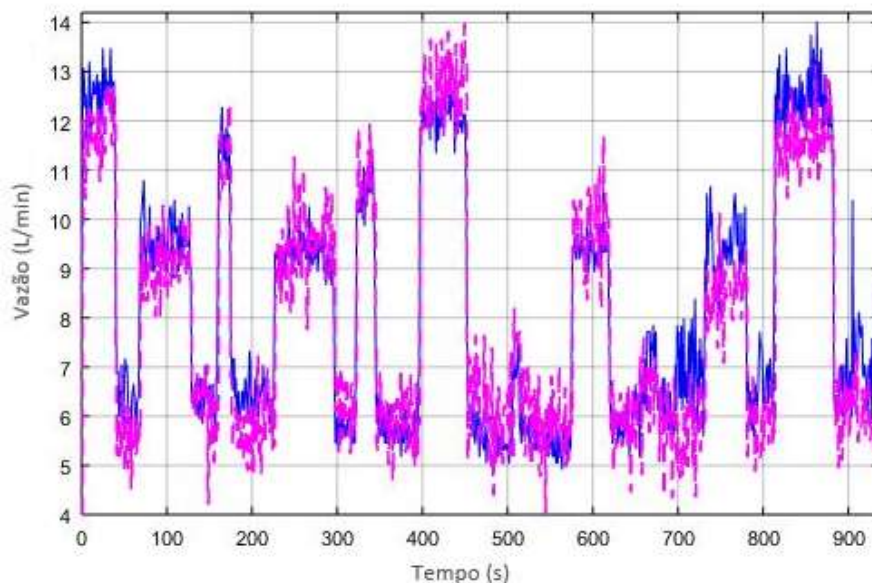
$$\begin{aligned} B(z) &= 21,48 \cdot z^{-1} - 27 \cdot z^{-2} - 43,88 \cdot z^{-3} - 42,45 \cdot z^{-4} - 21,12 \cdot z^{-5} - 16,04 \cdot z^{-6} \\ F(z) &= 1 - 1,407 \cdot z^{-1} - 2,274 \cdot z^{-2} - 2,322 \cdot z^{-3} - 1,31 \cdot z^{-4} - 0,924 \cdot z^{-5} - 0,099 \cdot z^{-6} \end{aligned} \quad (5)$$

A Tabela 1 apresenta os erros médios quadráticos calculados para cada um dos modelos apresentados, comparativamente com os dados de validação e a Figura 4 apresenta o comportamento da vazão em resposta a perturbações aleatórias da potência da bomba para a condição de menor erro (dados de validação – em rosa – e dados preditos pelo modelo – em azul), sendo este o modelo OE de ordem 6.

Tabela 1. Erro médio quadrático (RMSE) entre os dados de validação e o modelo identificado

Técnica de Identificação	Erro Médio Quadrático (RMSE)
FOPDT	1,285
ARX (Ordem 4)	1,18
ARX (Ordem 6)	1,363
OE (Ordem 4)	1,068
OE (Ordem 6)	1,067

Figura 4. Comportamento da vazão em resposta a perturbações aleatórias na potência da bomba – Dados experimentais x Modelo OE de Ordem 6



Pode-se observar que o modelo possibilita prever o comportamento da vazão de maneira satisfatória, possibilitando simular, por exemplo, o processo de enxague do protótipo em diversas condições de vazão do processo.

## **CONCLUSÃO**

As comparações realizadas entre os modelos matemáticos com as simulações implementadas possibilitaram identificar o modelo que representa, com menor erro, a resposta da vazão do sistema em estudo, para variações na potência da bomba. Os resultados obtidos neste trabalho apresentam a possibilidade de aplicação de técnicas de identificação de sistemas na representação de sistemas CIP no ambiente industrial.

O modelo discreto *Output Error* (OE) obtido, representou a resposta do sistema com menor erro, comparativamente aos demais modelos considerados neste estudo. Este possibilita um estudo com maior grau de precisão, por exemplo, do consumo de água e energia do processo CIP em protótipos similares, podendo ser estendido para implementação em sistemas industriais.

Além disto, estas simulações possibilitam o estudo de diversas condições operacionais do processo sem o consumo de insumos, representando economia e redução do impacto ambiental.

## **AGRADECIMENTOS**

À UFU pela flexibilização do uso dos laboratórios didáticos para a obtenção dos dados experimentais utilizados neste trabalho.

## **REFERÊNCIAS**

- Bode, K.; Hooper, R. J.; Paterson, W. R.; Wilson, D. I.; Augustin, W.; Scholl, S. Pulsed flow cleaning of whey protein fouling layers. *Heat Transf. Eng.*, v. 28, p. 202-209, 2007.
- Brasileiro, R.G. Estratégia de controle de sistema CIP baseada em múltiplos modelos. Uberlândia – MG: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2021. Mestrado.
- Campdepadrós, M.; Stchigel, A. M.; Romeu, M.; Quilez, J.; Solà, R. Effectiveness of two sanitation procedure for decreasing the microbial contamination levels (including *Listeria monocytogenes*) on food contact and non-food contact surfaces in a dessert-processing factory. *Food Control*, v. 23, p. 26-31, 2012.
- Fryer, P. J.; Christian, G. K.; Liu, W. How hygiene happens: physics and chemistry of cleaning. *International Journal of Dairy Technology*, v. 59, n. 2, p. 76-84, 2006.
- Goode, K. R.; Asteriadou, K.; Robbins, P. T.; Fryer, P. J. Fouling and cleaning studies in the food and beverage industry classified by cleaning type. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf*, v. 12, p. 121-143, 2013.
- Niamsuwan, S.; Kittisupakorn, P.; Mujtaba, I. M. Minimization of water and chemical in the cleaning in place process of a milk pasteurization plant. *Songklanakarín J. Sci. Technol.*, v. 33, p. 431-440, 2011.
- Seborg, D. E; Edgar, T. F; Mellichamp, D. A. *Process Dynamics and Control*. 2. ed. New Jersey: John Wiley, 2011
- Silva, L. D. Análise da Limpeza CIP e Avaliação da Sanitização Utilizando Vazão Pulsada. 2018. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.