

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL ESTATÍSTICA DE UM SISTEMA GESTOR DE LÍQUIDO

Filipe José Ferreira Chaves¹, Bianca Viana de Sousa², José Nilton Silva³, Heleno Bispo da Silva Junior⁴

¹ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Químicas -
felipejosefchmail@gmail.com

² Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química - biancavianaeg@gmail.com

³ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Químicas - nilton@eq.ufcg.edu.br

⁴ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química -
heleno.bispo@eq.ufcg.edu.br

RESUMO

A modelagem e simulação de processos, e sua posterior validação, são consideradas etapas primordiais para o desenvolvimento e análise de processos e/ou novas tecnologias. Sendo assim, uma unidade gestora de líquido piloto, dotada de um sistema de aquecimento, foi utilizada como caso base. A modelagem fenomenológica diferencial foi desenvolvida e parâmetros inerentes ao processo foram ajustados através de validação experimental estatística. O modelo ajustado foi então reavaliado e validado, apresentando uma significância acima de 94%, considerando um erro alfa de 6% obtido através do teste estatístico P. A significância obtida, baseada na distribuição de t de Student, demonstra a capacidade de resposta do modelo, o qual pode ser utilizado para avaliação e otimização do processo.

Palavras chave – Modelagem, Validação experimental estatística, Nível de significância.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da complexidade dos mercados e consumo tem exigido continuamente das organizações o desenvolvimento de novas metodologias, no intuito de melhorar o custo benefício do processos [Pergher et al, 2013; Prado et al, 2011]. Um método para otimização de processos geralmente pode envolver diversas considerações e sua formulação nem sempre é óbvia. Frente a necessidade de aperfeiçoar o processo surge a modelagem matemática e a simulação de processos, que segundo Cota et al [2010] são métodos de aplicações muito

comuns e extremamente importantes para a ciência e a indústria no que diz respeito ao entendimento de processos contínuos.

O uso de modelos desenvolvidos a partir dos princípios fundamentais (abordagem fenomenológica), do ponto de vista do design e análise de processos químicos, tornou-se uma poderosa ferramenta para compreensão dos fenômenos de um processos [Manzi et al, 2011]. Segundo Araújo [2015], a realização de considerações para que o modelo seja representativo, é imprescindível de modo que o tornem mais próximo possível da realidade (dimensões,

condições de operação, restrições, simplificações, etc).

A validação de modelos utilizando unidades piloto em operação é muito importante para consolidação das metodologias de análise. Além disso, é uma etapa crucial para o desenvolvimento de novas tecnologias, ou equipamentos. A importância de se modelar sistemas reais é evidenciado no âmbito de que os resultados obtidos podem ser usados para proporcionar um melhor conhecimento sobre tal sistema [Cota et al, 2010].

Para a demonstração e reforço do embasamento teórico, muitos trabalhos de simulação realizam validação a partir de dados coletados. Hajare, V. D. e Patre, B. M [2015] realiza um experimental em um tanque de nível, com o intuito de explorar a aplicabilidade do modelo em tempo real e a eficiência de controladores. Altunten et al [2008] utiliza um reator do tipo batelada, na realização de experimentos com o objetivo de validar estratégias de controle e determinação das condições ótimas de operação a partir dos modelos propostos.

Dessa forma, uma unidade gestora de líquido piloto, dotada de um sistema de aquecimento, foi utilizada como caso em estudo. A modelagem fenomenológica diferencial foi desenvolvida e parâmetros inerentes ao processo foram ajustados através

de validação experimental. Para entender as sucessivas observações do sistema e/ou fenômenos que não produzem exatamente o mesmo resultado (evento conhecido como variabilidade do processo), o presente artigo também dedica-se ao estudo da estatística e das ferramentas necessárias para a validação dos modelos. A simulação dinâmica do processo foi realizada, e o modelo ajustado foi então reavaliado e validado. A significância obtida, através da análise estatística baseada através do teste estatístico P (Probabilidade de significância) e na distribuição de t de Student, demonstra a capacidade de resposta do modelo, o qual pode ser utilizado para avaliação e otimização do processo.

2. METODOLOGIA

2.1. Modelo do sistema gestor de líquido

Considere o seguinte tanque agitado com um sistema de aquecimento para o processo do sistema gestor de líquido, mostrado na Fig. 1.

O modelo matemático que descreve o processo de acordo com Stephanopoulos [1984] é dado pelas seguintes equações:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{F_g - F_s}{A}$$

[1]



$$\frac{dT}{dt} = \frac{F_e(T_e - T)}{AH} + \frac{\dot{Q}}{\rho C_p A h}$$

[2]

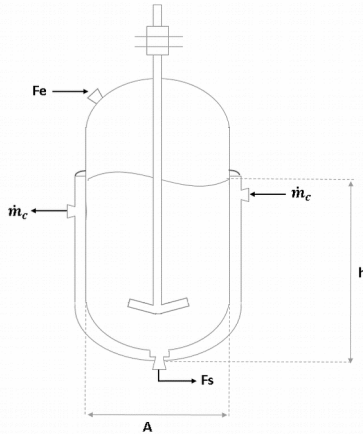


Figura 1: Diagrama esquemático do sistema gestor de líquido

Onde, h , F_e , F_s , T_e , T e A , denotam a altura do tanque, o fluxo de entrada, o fluxo de saída, a temperatura da corrente de entrada, a temperatura e a Área do tanque, respectivamente. Em adição, C_p é o calor específico, ρ densidade, e Q a quantidade de calor transferido para o sistema.

Além das equações de balanço, faz-se necessário, para complementar a modelagem matemática, as chamadas equações constitutivas, que podem expressar o equilíbrio termodinâmico, as taxas de reação, de transferência de calor, de massa e momento [Kwong,2002]. Dessa maneira, para que o modelo seja o mais representativo possível do sistema, uma análise dos possíveis comportamentos do fluxo de saída e da transferência de calor foi realizado e segue apresentada nas equações 3 e 4.

$$F_s = C_D \times a_s \times \sqrt{2 \times g \times h} \quad [3]$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \times C_p \times \left[(T_{fr} - T) \left(1 - e^{\frac{-U A_T}{\dot{m}_c \times C_p}} \right) \right] \quad [4]$$

As condições de operação do reator, os parâmetros do modelo e as propriedades termodinâmicas, são resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Condições operacionais e parâmetros para o modelo do sistema gestor de líquido.

Var	Valor	Var.	Valor
F_e	$68 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	T_{\max}	$60 \text{ }^\circ\text{C}$
A	$1,77 \times 10^{-2} \text{ m}^2$	T_e	$28 \text{ }^\circ\text{C}$
a_s	$5,03 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	T_{fr}	$60 \text{ }^\circ\text{C}$
G	$9,8 \text{ m/s}^2$	$U A_t$	$100 \text{ J/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$
ρ	1000 kg/m^3	\dot{m}_c	$58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
C_d	$0,695$	C_p	$4180 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
P	1 atm	H	$0,25 \text{ m}$

Para a modelagem do fluxo de saída, Eq.3, foi aplicado o balanço de energia mecânica ao sistema, Eq.5. Onde, as perdas por atrito foram traduzidas em termos do coeficiente de descarga, CD , assim como reportado por Aiche [1999] e Crowl e Louvar [2011]. Em que, a_s é a área da seção transversal da corrente de saída e g a aceleração da gravidade.

$$\frac{\Delta u^2}{2} + g \times \Delta h + \frac{\Delta P}{\rho} + \sum \hat{F} = \hat{Q} - \hat{W} \quad [5]$$

Na qual, u é a velocidade do fluido, P pressão do fluido, W o trabalho e \hat{F} representa as perdas por atrito. Aplicando a Equação 5 para sistemas abertos e sabendo que, não existe variação de pressão, não é gerado ou



recebido energia na forma de calor, e não existe trabalho a Eq. 5 resumiu-se a:

$$g \times (h_1 - h_2) = \frac{u_2^2}{2} + \sum \hat{F}$$

[6]

A perda por atrito, dada pela Eq.7 representam a redução de energia (perda de carga) devido ao atrito mecânico do escoamento com as paredes das tubulações e acessórios, tais como válvulas, cotovelos, orifícios; e as entradas e saídas de tubulação [Aiche,1999].

$$\sum \hat{F} = \left[4 \times f \frac{\sum L}{D} + \sum K \right] \times \frac{u^2}{2}$$

[7]

Onde D é o diâmetro e L o comprimento da tubulação. Sendo K as perdas localizadas (referentes aos acessórios) e f o fator de atrito. A determinação do fator de atrito é realizada a partir da equação de Colebrook (Eq.8), no qual ε é a rugosidade e Re é o número de Reynolds [Chapra,2013].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 * D} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right)$$

[8]

Portanto, em termos da velocidade de saída a Eq.6 é rearranjada para:

$$u_2^2 = \frac{2 \times g \times h}{\left[1 + 4 \times f \frac{\sum L}{D} + \sum K \right]}$$

[9]

Por conseguinte, a velocidade é proporcional a raiz quadrada da altura, como pode ser observada pela equação 10.

$$u_2 = \sqrt{2 \times g \times h} \times \frac{1}{\sqrt{1 + K_f}}$$

[10]

Logo, o coeficiente de descarga pode ser calculado da seguinte forma:

$$C_D = \frac{1}{\sqrt{1 + K_f}}$$

[11]

De acordo com o Fogler [2013] a taxa de transferência de calor, Eq. 4, pode ser desenvolvida através do balanço de energia aplicado a serpentina, que leva em consideração a resistência a transferência de energia e o fluido de transferência de calor. Na qual, $\dot{m}c$ é a vazão mássica e T_{fr} a temperatura do fluido de transferência de calor, U o coeficiente global de troca térmica e A_T , a área de troca térmica da serpentina.

2.2. Procedimento experimental estatístico

Para explorar a aplicabilidade em tempo real e a eficácia do modelo proposto, o módulo experimental do sistema gestor de líquido, juntamente com o módulo de controle é mostrado nas Fig. 2, foi utilizado.



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO



Figura 2: Planta piloto do sistema gestor de líquido

2.2.1. Validação experimental

Durante o experimento, a válvulas V1 é mantida 70% aberta e a V2 totalmente aberta. O procedimento seguinte é usado para obter os dados do comportamento do nível do sistema.

1. Encheu-se o tanque até uma altura de 110 milímetros e em seguida um sinal, de 0,35 Volts, é dado como uma entrada aplicada à bomba de alimentação do sistema;

2. Os Níveis do tanque e o fluxo em volts são registrados com um período de amostragem de 1 decimo de segundo (0.1s).

3. A partir dos dados do nível do tanque para cada valor de rotação da bomba, consequentemente de fluxo, um novo estado estacionário pode ser alcançado e assim, o nível em milímetros foi medido;

4. Da mesma forma, a partir do estado estacionário o valor do fluxo, em ml/s, foi

obtido a partir da medição de determinada porção volume em relação ao tempo (procedimento realizado para verificar se os dados de fluxo obtidos pelo sistema de aquisição de dados eram compatíveis com o fluxo real);

5. Por fim, foi realizado um experimento de enchimento do tanque, onde o fluxo de líquido era mantido no valor máximo.

O procedimento seguinte foi usado para a obtenção dos dados do comportamento da temperatura do sistema, quando o aquecimento era ligado:

1. Um sinal foi aplicado à bomba de alimentação do tanque de modo que o nível fosse mantido em 120 mm;

2. Com nível estabilizado, o sistema de aquecimento foi ligado e o fluxo de aquecimento mantido no valor máximo.

2.2.2. Validação estatística

Uma estimativa de intervalo de confiança para o modelo do nível e temperatura do sistema foi proposto da forma $l \leq \mu \leq u$, em que μ representa o modelo e os extremos, l e u , são calculados a partir de dados da amostra.

Uma vez que diferentes amostras produziram diferentes valores de l e u , esses extremos são valores de variáveis aleatórias L e U , respectivamente. Sendo assim,

$$P\{L \leq \mu \leq U\} = 1 - \alpha$$

[12]

Dessa forma, há uma probabilidade de $1 - \alpha$ de selecionar uma amostra para qual o IC conterá o valor verdadeiro de μ . Uma abordagem do valor P foi adotada para evitar que os resultados sejam rejeitados com um valor específico de α (nível de significância).

Quanto ao intervalo de confiança, a distribuição foi escolhida principalmente por consequência do tamanho da amostra e pela variância ser desconhecida. O intervalo de confiança é dado pela Eq.13.

$$-x_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \leq X \leq x_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$$

[13]

Onde, os valores de $\pm x_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$, foram determinados por meio de uma função interna do Excel.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Coeficiente de descarga

Para a determinação do fator de atrito a partir da equação de Colebrook foram coletados alguns dados do sistema e do fluido de trabalho, estes dados encontram-se na Tabela 2. A determinação do fator de atrito resulta em um problema de encontrar a raiz da equação. Desse modo, foi utilizado uma função interna do Matlab®, fzero, para encontrar seu valor.

Com o fator de atrito determinado, com os valores da perda de carga referentes aos acessórios e com o comprimento da tubulação (os dados encontram-se na Tabela 3), é possível determinar o coeficiente de descarga de 0,695.

Tabela 2: Dados para o cálculo do f .

Diâmetro (m)	$8 \cdot 10^{-3}$
Rugosidade (m)	$4,5 \cdot 10^{-5}$
Densidade (kg/m³)	1000
Viscosidade (N*s/m²)	$1,003 \cdot 10^{-3}$
Número de Reynolds	$9,9907 \cdot 10^3$

Tabela 3: Dados para o cálculo do Cd.

Comprimento reto de tubos (m)	$3,5 \cdot 10^{-2}$
Curva de 90° (m)	0,20
Fator de atrito (f)	0,0384

3.2. Validação experimental estatística do modelo

O modelo de nível elaborado em plataforma MATLAB® foi testado para diferentes condições estacionárias do processo e comparadas com seus valores experimentais. O resultado obtido encontra-se na Fig. 3.

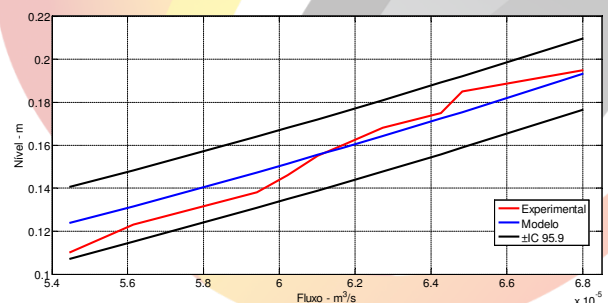


Figura 3: Resultado da análise estatística realizada para validação do modelo com base no conjunto de dados experimentais

Segundo Montgomery (2009), uma forma de reportar os resultados de um teste de hipóteses é estabelecer se a hipótese nula foi rejeitada com um valor especificado de α (nível de significância). Porém a conclusão desta maneira é frequentemente inadequada, pois não dá ideia, ao tomador de decisão, se o valor calculado do teste está nas proximidades ou muito longe da região de rejeição.

Outra maneira de proceder consiste em apresentar a probabilidade de significância ou valor-p do teste [BUSSAB e MORETTIN, 2010], visto que o mesmo limita o valor de α e confere a noção do nível de significância. Nesta análise estatística, foi calculado um valor P de 4,098%, ou seja, para um α de 4,10% o modelo representa satisfatoriamente a determinação dos estados estacionário apresentadas pelo experimento com confiança de até 95,9%.

A figura 4 apresenta o resíduo entre os dados experimentais e o modelo para as diferentes condições estacionárias.

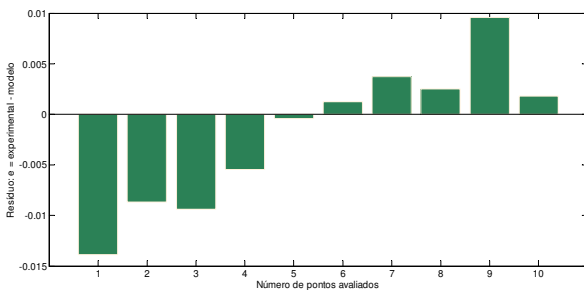


Figura 4: Resíduo entre os dados experimentais e o modelo para as diferentes condições estacionarias.

A interpretação do intervalo de confiança está em compreender que, se um número infinito de amostras aleatórias é coletado em um intervalo de confiança Y%, por exemplo, para o modelo/experimento é calculado a partir de cada amostra, Y% desses intervalos conterão o comportamento verdadeiro do modelo/experimento.

3.3. Análise dinâmica do comportamento do modelo de nível

O modelo do nível foi testado para operação dinâmica do sistema e os resultados comparados com o experimental. O resultado obtido com este valor encontra-se na Fig. 5.

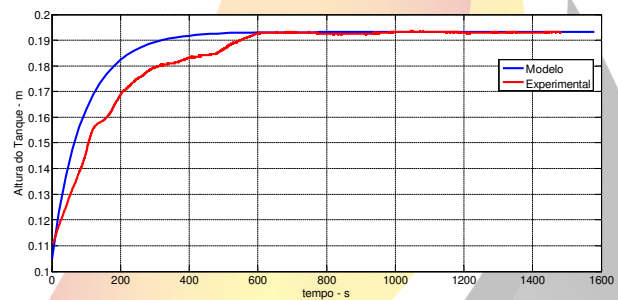


Figura 5: Resultado experimental do comportamento dinâmico do sistema e do modelo

Embora os perfis obtidos no experimento e no modelo, no estado estacionário, sejam bastante semelhantes, é perceptível na Fig. 5 que o experimento requer mais tempo para atingir o estado estacionário. Tal comportamento demonstra que existem outros fatores externos que o modelo não prevê, os quais influenciam o

sistema, observando-se certo atraso dos dados experimentais em relação ao modelo.

A figura 6 apresenta o resíduo entre os dados experimentais e o modelo de nível para 10 pontos igualmente espaçados iniciando no tempo zero.

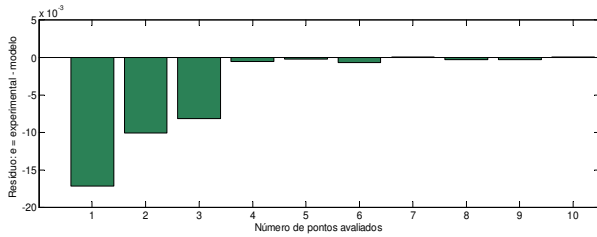


Figura 6: Resíduo entre os dados experimentais e o modelo de nível.

Para a análise estatística do modelo de nível, a Fig. 5 foi dividida em dois gráficos: um da parte dinâmica e outro para a parte estacionária. Esses resultados são visualizados nos nas figuras 7 e 8.

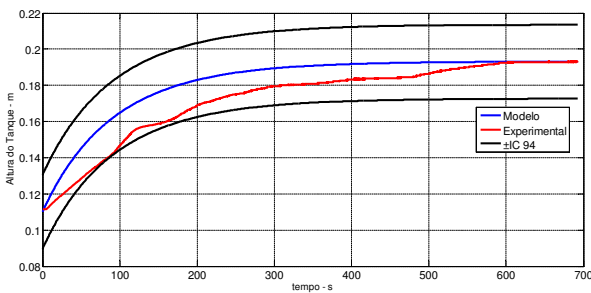


Figura 7: Validação do modelo analisando o comportamento dinâmico do sistema.

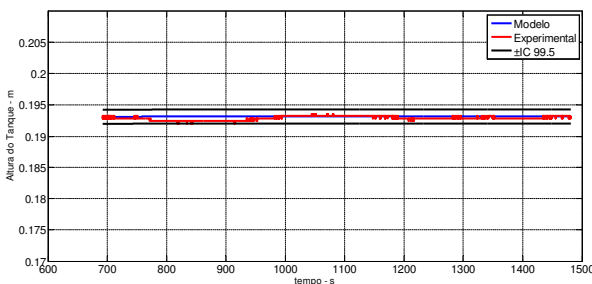


Figura 8: Validação do modelo analisando o comportamento estacionário do sistema.

Como resultado, foi obtido um valor P de 5,70% para a parte dinâmica e um valor de 0,17% para o estado estacionário. Dessa forma, para um α de 6,00% e 0,50% os modelos representam satisfatoriamente o experimento com confiança de até 94% e 99,5%, para a dinâmica e o estado estacionário do tanque, respectivamente.

3.4. Análise dinâmica do comportamento do modelo da temperatura

O modelo da temperatura do sistema (Eq.2) foi avaliado para operação dinâmica e os resultados comparados com o experimental. A avaliação dos resultados levou em consideração três análises da carga térmica fornecida ao sistema, a partir da Eq.4.

Para o primeiro caso da análise de carga térmica, considerou-se que a taxa de calor (Q) trocada, pode ser expressa pela quantidade de calor sensível Eq.14. No segundo caso considerou-se que a Eq.4 para valores grandes de vazão do fluido refrigerante, o valor numérico do expoente será pequeno, logo quando expandido em série de Taylor, encontra-se a Eq.15 e finalmente o terceiro caso é a própria Eq.4.

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \times C_p \times \Delta T$$

[14]

$$\dot{Q} = UAt \times \Delta T$$

[15]

Os resultados obtido para cada estudo de caso do comportamento da transferência de calor encontram-se nas Fig. 9,10 e 11.

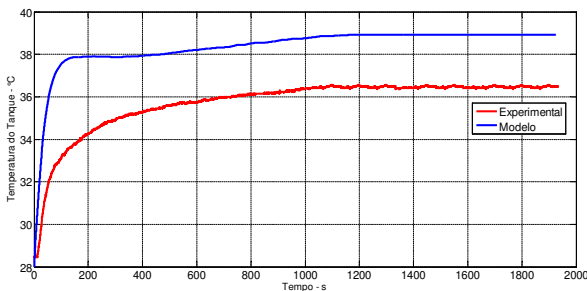


Figura 9: Resultado processo e modelo para o primeiro caso da análise da carga térmica.

Na Fig. 9 percebe-se que a temperatura prevista pelo modelo, utilizando o primeiro caso da taxa de transferência de calor, é mais elevada, que a apresentada pelo experimento. Este tipo de comportamento já era esperado, uma vez que o modelo não considera qualquer resistência a transferência de calor do fluido de aquecimento para o sistema.

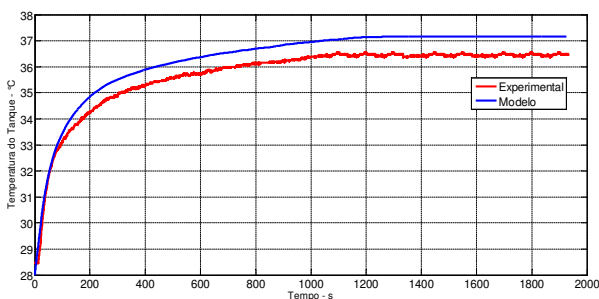


Figura 10: Resultado processo e modelo para o segundo caso da análise da carga térmica

A Fig. 10 expressa a análise do modelo, quando a taxa de transferência de calor é expressa em termos do coeficiente global de

transferência de calor. Neste caso, embora o modelo ainda continue prevendo uma temperatura maior do que a obtida no experimento é perceptível que seu comportamento está muito próximo do experimental.

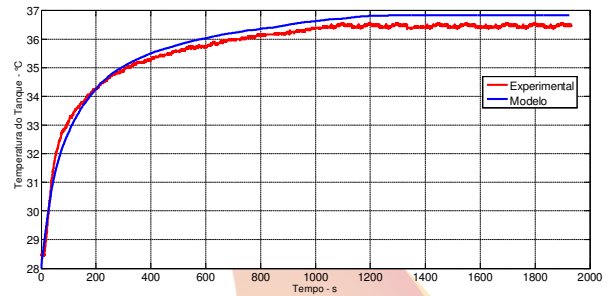


Figura 11 - Resultado processo e modelo para o terceiro caso da análise da carga térmica

Percebe-se que o comportamento do modelo quando considerado o terceiro caso da taxa de transferência de calor aproximou-se ainda mais do comportamento obtido através do experimento. Isso é justificável devido a quantidade de informação que o modelo leva em consideração.

Dessa forma, foram considerados apenas o segundo e terceiro caso para avaliação estatística do modelo de temperatura.

As Fig. 12 e 13 apresentam o resíduo entre os dados experimentais e o modelo de temperatura para o segundo e terceiro caso da análise da carga térmica, respectivamente. Foram considerando 10 pontos igualmente espaçados iniciando no tempo zero.



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

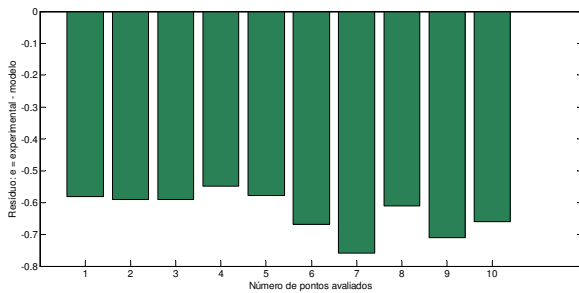


Figura 12: Resíduo do segundo caso da análise da carga térmica.

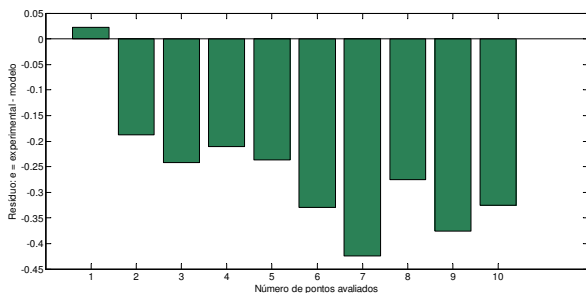


Figura 13: Resíduo do terceiro caso da análise da carga térmica.

Para a análise estatística do modelo de nível, as Fig. 10 e 11 foram divididas em dois gráficos: um da parte dinâmica e outro para a parte estacionária. Na análise dinâmica, foi calculado um valor P de 1,55% e 0,64% para o segundo e terceiro caso, respectivamente.

Sabe-se o valor P limita α e confere a noção do nível de significância. Para um α de 2,00% e 1,00% os modelos representam satisfatoriamente o experimento com confiança de até 98% e 99% para a temperatura do tanque na análise dinâmica. Esses resultados são visualizados nas figuras 14 e 15.

No estado estacionário foi calculado um valor P de 1,92% e 1,1% para o segundo e terceiro caso, respectivamente. Para um α de 2,00% e 2,00% os modelos representam satisfatoriamente o experimento com confiança de até 98% para a temperatura do tanque na análise estacionária, assim como ser observado nas figuras 16 e 17.

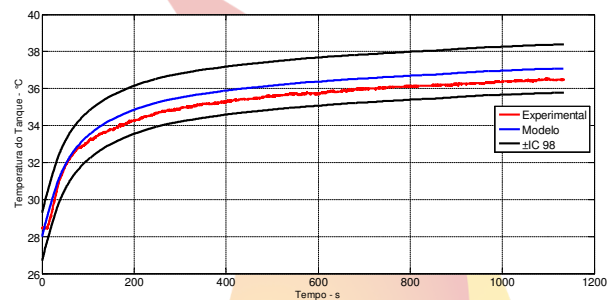


Figura 14: Validação do modelo com base no comportamento dinâmico da temperatura para o segundo caso da carga térmica.

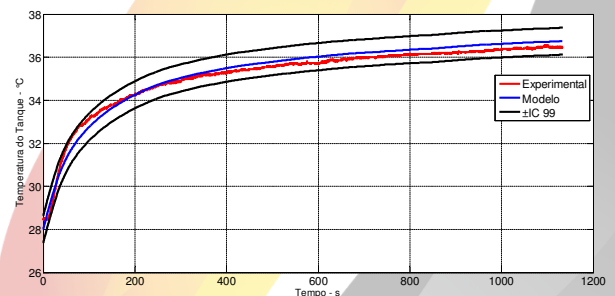
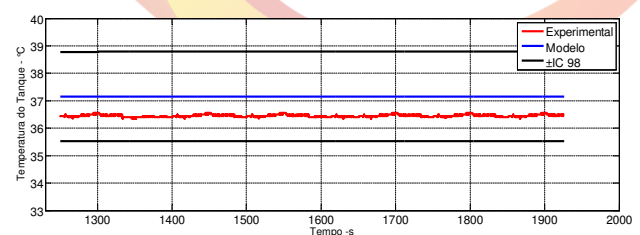


Figura 15: Validação do modelo com base no comportamento dinâmico da temperatura utilizando o modelo para o terceiro caso da carga térmica.



www.conepetro.com.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

Figura 16: Validação do modelo com base no comportamento estacionário da temperatura para o segundo caso da carga térmica.

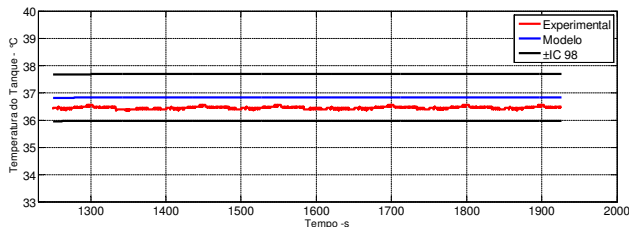


Figura 17: Validação do modelo com base no comportamento estacionário da temperatura para o terceiro caso da carga térmica.

4. CONCLUSÕES

A aplicação da simulação no contexto estudado permitiu observar os diversos comportamentos do processo frente a diferentes configurações, possibilitando a compreensão dos fenômenos que o representa. Uma vez que os modelos foram validados, os mesmos podem ser utilizados para realização de testes prévios à operação experimental, por não representar riscos, custos e não demandar recursos.

Na análise dos conjuntos de dados para o modelo de nível e temperatura pode-se inferir que os mesmos representaram significativamente a unidade, uma vez que é possível garantir com uma alta probabilidade selecionar uma amostra para qual o intervalo de confiança conterá o valor verdadeiro do comportamento do sistema.

O processo foi avaliado, sobretudo, por métrica técnica e quantificado quanto em

relação ao seu potencial de integrar procedimentos estatísticos e experimentais. Os resultados apresentados identificam a viabilidade da pesquisa e sustentam a sua importância. Dessa forma, o projeto atendeu aos requisitos propostos, apresentando grande potencial de aplicabilidade.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal de Campina Grande e ao Programa de Educação Tutorial (PET).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AICHE (American Institute of Chemical Engineers). *Guidelines for Chemical Quantitative e Risk Analysis*. Copyright, 1999.
- ALTINTEN, A.; KETEVANLIOGLU, F.; HAPOGLU, H. ALPBAZ M. *Self-Turning PID Control of Jacketed Batch Polystyrene Reactor Using Genetic Algorithm*. Chemical Engineering Journal, v. 138, p. 490-497, 2018.
- ARAÚJO, W. R. *Modelagem, avaliação e validação de uma coluna de destilação piloto*. 2015, 24p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química. Campina Grande-PB.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. *Estatística Básica*. Saraiva, 2010.

COTA, F.; TORRES, A.; RODRIGUES, L.; RODRIGUES, D.; MOREIRA, K. *Modelagem Matemática do Sistema de Temperatura da Planta Didática de Automação Industrial SMAR-PD3*.

CHAPRA, S. C. *Métodos Numéricos Aplicados com Matlab para Engenheiros e Cientistas*. Bookman, 2013.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. *Chemical Process Safety: fundamentals with applications*. Prentice Hall, 2011.

FOGLER, H. S. *Elementos de Engenharia das Reações Químicas*. Copyright, 2013.

HAJARE, V.; PATRE, B. *Decentraized PID Controller for TITO Systems Using Characteristic Ratio Assignment with an Experimental Application*. ISA Transactions, v. 59, p. 385-387, 2015.

KWONG, W. H. *Introdução a controle de processos químicos com Matlab (Volume 1 e volume II)*. EdUFSCar, 2002.

MANZI, J.; BRITO, H.; BISPO, H. *Designing Control System with Entropic Modeling*. Chemical Engineering Science, v. 66, p. 530-537, 2011.

MONTGOMERY, D. C. *Introduction to Statistical Quality Control*. United States of America, 2009.

PRADO, G.; ALMEIDA, H.; SILVA, F.; FILETI, A. *Uso de Simuladores Comerciais na Análise Comparativa de Desempenho de Controladores para um Trocador de Calor de Placas*. Exacta, v.9, p. 71-87, 2011.

PERGHER, I.; VACCARO, G.; PRADELLA, M. *Aplicação da Simulação Computacional para Determinar a Capacidade Produtiva do Processo de Produção de Pães: um estudo de caso*. Produto & Produção, v. 14, p. 22-39, 2013.

STEPHANOPOULOS, G. *Chemical Process Control: an Introduction to Theory Practice*. Prentice Hall, 2009.