

MODELAGEM, SIMULAÇÃO, IDENTIFICAÇÃO E CONTROLE DE UMA PLANTA DIDÁTICA COM VARIÁVEIS DE NÍVEL E TEMPERATURA

MOISÉS TAVARES DA SILVA*, RAFAEL BEZERRA CORREIA LIMA*, LUCAS JOSÉ DA SILVA MOREIRA*,
RAPHAEL DE MEDEIROS SOUTO MAIOR BALTAR*, PÉRICLES REZENDE BARROS*

**Departamento de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Campina Grande
Campina Grande, Paraíba, Brasil*

Emails: moises.silva@ee.ufcg.edu.br, rafael.lima@ee.ufcg.edu.br,
lucas.moreira@ee.ufcg.edu.br, raphael.baltar@ee.ufcg.edu.br, prbarros@dee.ufcg.edu.br

Abstract— This paper describes the modeling, simulation, identification and the control of a didactical plant with level and temperature as control variables. The phenomenological plant model is developed by the physical relations involved, then simplified models for the temperature and level are identified and the lastly a PID control project is suggested for the system. Theoretical developments presented in this text are compared with the experimental data collected in the same didactical plant.

Keywords— Modeling, Identification, Control, Didactical Plant

Resumo— Neste trabalho é realizada a modelagem, simulação, identificação e controle de uma planta didática com variáveis de nível e temperatura. O modelo fenomenológico da planta é construído por meio das relações físicas envolvidas, em seguida são identificados modelos simplificados das malhas de nível e temperatura e por fim um projeto de controle PID é sugerido. Os desenvolvimentos teóricos apresentados são confrontados com dados experimentais coletados na própria planta didática.

Palavras-chave— Modelagem, Identificação, Controle, Planta didática

1 Introdução

Processos em escala de laboratório são ferramentas importantes que auxiliam no estudo acadêmico de vários fenômenos observados na indústria. Através da utilização de plantas didáticas é possível demonstrar a operação de diversas malhas de controle utilizando equipamentos e ferramentas de configuração desenvolvidos para aplicação em controle industrial.

Em um arranjo compacto, a planta didática torna acessível aos estudantes todos os componentes das malhas, não sendo apenas uma estrutura para ser observada, mas também para ser manipulada (SMAR, 2015).

A modelagem e simulação são ferramentas importantes, muitas vezes usadas para investigar o comportamento dos sistemas na indústria. A modelagem é o processo de formulação dos efeitos dinâmicos do sistema que serão considerados através de equações matemáticas (Roffel e Betlem, 2006). A simulação permite o conhecimento mais aprofundado do sistema, assim como a alteração das características do processo com o mínimo de gasto.

Uma alternativa ao desenvolvimento do modelo fenomenológico, que na maioria dos casos é um procedimento custoso e complexo, é a identificação de sistemas por meio de dados experimentais. Na maioria dos casos industriais, modelos simples, linearizados em torno de um ponto de operação, são suficientes para o projeto satisfatório do sistema de controle. Detalhes sobre as técnicas de identificação são encontrados em So-

derstrom e Stoica (1989) e Ljung (1999).

O controlador PID (Proporcional + Integral + Derivativo) continua a ser o principal componente no controle industrial. De acordo com Astrom e Hagglund (2006), mais de 95% das malhas de controle na indústria utilizam o PID. Isso se deve ao fato de que tais controladores mostram um bom desempenho para vários tipos de processos.

Neste artigo, a fim de compreender a dinâmica do processo em estudo, inicialmente é realizada a modelagem e simulação das malhas de nível e temperatura da planta didática industrial. O modelo obtido é simulado e confrontado com a planta didática real. Os resultados das simulações são avaliados quantitativamente e qualitativamente. Além disso, são identificados os modelos das malhas de nível e temperatura, os quais são utilizados no projeto de controladores PID.

A realização das etapas de modelagem, identificação e projeto do controlador tem por objetivo motivar o estudante da disciplina de controle e automação do curso de Engenharia Elétrica da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande).

Este artigo está organizado da seguinte maneira: na Seção 2 é descrito a planta didática utilizada neste trabalho. Na Seção 3 é apresentada a modelagem matemática da planta didática. Na Seção 4 os resultados das simulações dos modelos são discutidos e confrontados com dados experimentais. Na Seção 5 são identificados os modelos

simplificados para as principais malhas de controle, assim como são apresentadas algumas estratégias de controle. Por fim, na Seção 6, são apresentadas as conclusões.

2 Descrição da Planta

A configuração original da Planta Didática PD-3 do fabricante SMAR foi alterada para possibilitar a implementação de algumas estruturas de controle para a realização de pesquisas de interesse do laboratório. A planta didática reconfigurada, representada na Figura 1, é constituída por uma tanque de alimentação (Tanque 1) e outros dois tanques com as mesmas dimensões (Tanques 2 e 3). O Tanque 1 fornece água para o Tanque 2 por meio de uma bomba trifásica (B-1), por sua vez o Tanque 2 fornece água para o Tanque 3 e entre eles existe uma válvula proporcional (V-2) que retorna ao Tanque 1 novamente. Na saída do Tanque 3 existe uma válvula proporcional (V-1) que leva o líquido para o Tanque 1. No sistema estudado foi considerado o Tanque 2 totalmente cheio, sendo utilizado como *buffer* para o Tanque 3. O Tanque 2 apresenta uma resistência (R-1) de 4kW, controlada por meio de PWM (*Pulse-Width Modulation*), para aquecer a água e um medidor de temperatura (TI-001). Além disso, o Tanque 3 apresenta medidor de nível (LI-001).

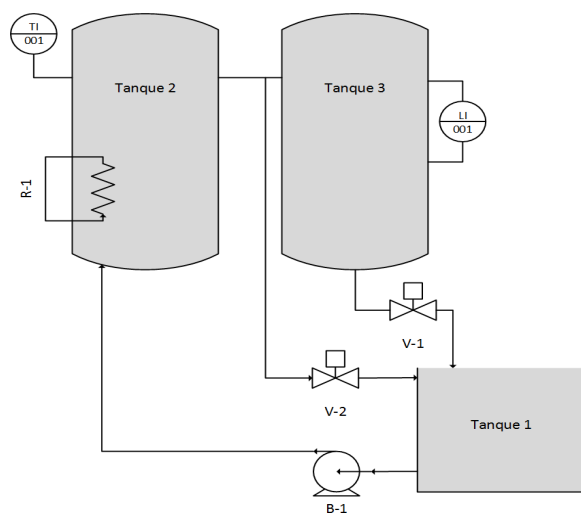


Figura 1: Representação da Planta Didática.

Um SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído) da fabricante *Emerson Process Management*, modelo *DeltaV*, coordena toda a execução do processo, e permite monitorar os sensores instalados na planta por meio de uma rede *Fieldbus Foundation* e atuar nos componentes do sistema de acordo com o padrão 4 a 20 mA. O monitoramento da planta é realizado por meio de uma estação dedicada, um microcomputador do tipo PC, configurada com um sistema de *Supervisory Control and Data Aquisition* (SCADA), para mo-

nitorar e atuar no sistema em funcionamento por meio da aquisição de dados e os disponibilizando em uma tela de operação e em arquivos de dados.

A comunicação entre o SDCD e a estação de trabalho é feita por meio de uma rede *ethernet* e o padrão de comunicação OPC (*OLE for Process Control*) para aquisição de dados e supervisão da operação.

3 Modelo Matemático da Planta Didática

A partir do conhecimento da dinâmica da planta didática em estudo, é possível obter um modelo matemático no formato de equações diferenciais que representem as principais características da planta. Tem-se por finalidade obter o modelo que descreve a temperatura do Tanque 2, bem como o nível no Tanque 3. Para isto foram realizadas algumas simplificações e considerações:

- Supõe-se que nenhuma mudança de fase ocorre nos fluidos do Tanque 2 e 3;
- O volume no Tanque 2 é constante, apresentando densidades e capacidade calorífica também constante;
- Os líquidos em ambos os tanques são perfeitamente homogêneos.

Para obter as equações diferenciais que regem o comportamento do sistema é necessário aplicar o princípio da conservação de massa e de energia. O princípio da conservação de massa quando aplicada a um sistema dinâmico, diz:

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Taxa de variação de} \\ \text{massa acumulada} \\ \text{no sistema} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{Taxa de massa} \\ \text{que entra no} \\ \text{sistema} \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|} \hline \text{Taxa de massa} \\ \text{que sai do} \\ \text{sistema} \\ \hline \end{array}$$

Figura 2: Balanço de Massa.

A primeira lei da termodinâmica estabelece o princípio da conservação de energia. Segundo Bequet (1998), para um sistema geral “aberto”(onde o fluxo de massa pode ocorrer para dentro e fora do sistema), tem-se:

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Taxa de variação da} \\ \text{energia interna,} \\ \text{cinética e potencial} \\ \text{dentro do sistema} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{Fluxo de energia} \\ \text{interna, cinética e} \\ \text{potencial que entra} \\ \text{no sistema} \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|} \hline \text{Fluxo de energia} \\ \text{interna, cinética e} \\ \text{potencial que sai do} \\ \text{sistema} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{Calor adicionado ao} \\ \text{sistema por} \\ \text{condução e radiação} \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|} \hline \text{Trabalho realizado pelo} \\ \text{sistema no ambiente} \\ \hline \end{array}$$

Figura 3: Balanço de Energia.

A partir das considerações acima, é possível desenvolver o balanço de massa e de energia dos

Tanques 2 e 3. A notação utilizada para as variáveis, descrições e as unidades de engenharia são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Notação das principais variáveis.

Var.	Definição	Unidade
T	Temperatura do Tanque	$^{\circ}C$
V	Volume do Tanque	m^3
C_p	Calor específico do líq.	$kJ/kg.K$
ρ	Densidade específica	kg/m^3
A	Área do Tanque	m^2
Q	Quantidade de Energia	J
h	Altura da coluna de líq.	m
F_i	Vazão de entrada	m^3/s
F	Vazão de saída	m^3/s
β	Resistência de escoamento	m^2/s
p	Pressão	Pa

3.1 Balanço de massa do Tanque 2

A partir do balanço de massa e assumindo a densidade constante, tem-se:

$$\frac{dV \cdot \rho}{dt} = F_i \cdot \rho - F \cdot \rho \quad (1)$$

Também assumindo o volume constante ($dV(t)/dt = 0$), tem-se:

$$F_i = F \quad (2)$$

3.2 Balanço energético do Tanque 2

Considera-se o Tanque 2 com nível em 100% e com uma vazão de entrada F_i e vazão de saída F . Além disso, considera-se que o tanque perde calor para o ambiente. A parede do tanque é de aço inox.

Aplicando o princípio da conservação de energia tem-se que o balanço energético do Tanque 2 é dado por:

$$\frac{dTE}{dt} = F_i \cdot \rho_i \cdot TE_i - F \cdot \rho \cdot TE + Q + W_T, \quad (3)$$

onde TE é a energia total do sistema dada pela soma da energia cinética (KE), potencial (PE) e interna (U), ou seja, $TE = U + KE + PE$.

Para simplificar o modelo desconsidera-se a energia cinética e potencial ($KE = 0$ e $PE = 0$), assim escreve-se o trabalho total realizado sobre o sistema como uma combinação da energia adicionada ao sistema para “mover” o fluido para dentro do Tanque 2 e a energia que o sistema executa no entorno para “forçar” a saída do fluido. Isso nos permite escrever o balanço de energia como:

$$\frac{dU}{dt} = F_i \cdot \rho_i \cdot \left(U_i + \frac{p_i}{\rho_i} \right) - F \cdot \rho \cdot \left(U + \frac{p}{\rho} \right) + Q \quad (4)$$

Sendo p a pressão no Tanque 2 e a entalpia do sistema $H = U + p \cdot V$, pode-se reescrever o balanço de energia como:

$$\frac{dH}{dt} - \frac{dp \cdot V}{dt} = F_i \cdot \rho_i \cdot H_i - F \cdot \rho \cdot H + Q \quad (5)$$

Nota-se que $dp \cdot V/dt = V \cdot dp/dt + p \cdot dV/dt$, e o volume do Tanque 2 é constante. A quantidade de energia Q é dada pela quantidade de energia transferida ao tanque pela resistência elétrica ($Q_{elétrico}$) menos a quantidade de energia perdida para o ambiente através da parede do tanque (Q_{perdas}). Além disso, a alteração da pressão (p) pode ser ignorada, dado que a densidade é constante, assim:

$$\frac{dH}{dt} = F_i \cdot \rho_i \cdot H_i - F \cdot \rho \cdot H + Q_{elétrico} - Q_{perdas} \quad (6)$$

A entalpia é sempre determinado em relação a uma temperatura de referência T_{REF} , assumindo o calor específico do líquido (C_p) constante, tem-se que $H = C_p \cdot (T - T_{REF})$ e $H_i = C_p \cdot (T_i - T_{REF})$. Assim,

$$V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = F \cdot \rho_i \cdot C_p \cdot (T_i - T) + Q_{elétrico} - Q_{perdas} \quad (7)$$

Como a parede do tanque é feita de metal, tem-se uma boa condução de calor e a temperatura da parede pode ser descrita por:

$$C_{parede} \frac{dT_{parede}}{dt} = Q_{perda,parede} - Q_{perda,amb}, \quad (8)$$

onde C_{parede} é a capacidade de calor da parede do tanque e:

$$\begin{aligned} Q_{perda,parede} &= \alpha_{água} (T - T_{parede}) \\ Q_{perda,amb} &= \alpha_{isol} (T_{parede} - T_{amb}) \end{aligned} \quad (9)$$

O termo $Q_{perda,parede}$ é a perda de calor a partir da água para a parede do tanque e $Q_{perda,amb}$ é a perda de calor a partir da parede do tanque para o ambiente. O termo $\alpha_{água}$ é coeficiente de transferência de calor da água e α_{isol} é coeficiente de transferência de calor do isolamento. Normalmente $\alpha_{água} \gg \alpha_{isol}$, já que a transferência de calor através da água é muito maior do que através do isolamento. Portanto, considera-se que $T_{parede} \approx T$ e as Equações (7) e (8) podem ser combinadas:

$$\begin{aligned} (V \cdot \rho \cdot C_p + C_{parede}) \frac{dT}{dt} &= F_i \cdot C_p \cdot (T_i - T) \\ &+ Q_{elétrico} - \alpha_{isol} \cdot (T - T_{amb}) \end{aligned} \quad (10)$$

3.3 Balanço de massa do Tanque 3

De maneira geral o balanço de massa para o tanque, mostrado na Figura 4 é dado pela Equação (11). Esta equação relaciona a taxa de mudança da massa m à diferença entre o fluxo de massa de entrada (F_i) e o fluxo de massa da saída (F).

$$\frac{dm}{dt} = F_i - F \quad (11)$$

Sendo, $\rho = m/V$, tem-se que:

$$m = \rho.V = \rho.A.h \quad (12)$$

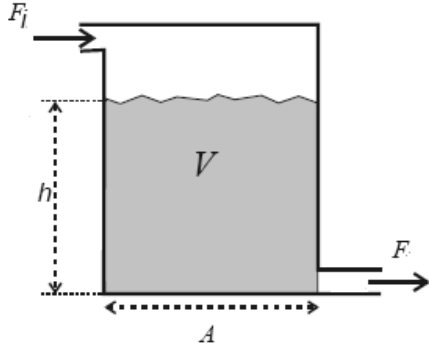


Figura 4: Representação do Tanque 3.

Substituindo a Equação (12) em (11), tem-se:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} \cdot (F_i - F) \quad (13)$$

De acordo com Roffel (2006), o fluxo de saída (F) é dada por:

$$F = \beta.h^x \quad (14)$$

onde β representa a resistência ao escoamento e x informa se o fluxo de saída é laminar ou turbulento.

O coeficiente x deve ser determinado experimentalmente e apresenta valores entre 0 e 1.

Após substituir a Equação (14) em (13), tem-se:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} \cdot (F_i - \beta.h^x) \quad (15)$$

3.4 Resistência ao Escoamento

Todo processo que envolve fluxo de fluidos deve ser estudado considerando o fluxo laminar ou fluxo turbulento, na Equação (14) x é a variável que informa qual é o tipo de fluxo. Na Figura 5 é representado as características dos fluxos laminar e turbulento em uma tubulação (Ribeiro, 1999).

De acordo com (Roffel e Betlem, 2006) o fluxo laminar e turbulento são investigados através de simulações. No caso de laminar o expoente x é aproximadamente igual a um, no caso da saída turbulenta é aproximadamente igual a 1/2. Os valores de β , Equação (14), podem ser obtidos experimentalmente.

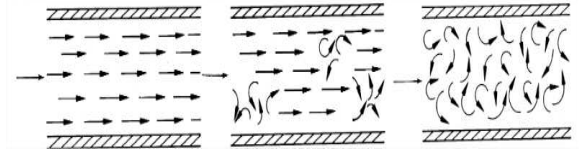


Figura 5: Fluxo laminar, transição e turbulento.

4 Simulação e Verificação Experimental do Modelo

Nesta seção são apresentados e avaliados os resultados obtidos a partir do modelo simulado e da planta didática real.

Para as simulações apresentadas, os parâmetros físicos da planta didática estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros físicos da planta didática.

Parâmetro	Valor
V	0,0261 m ³
C _p	4,176 kJ/kg.K
ρ	1000 Kg/m ³
A	0,0379 m ²
Q	4 kJ
F _i	0,0000439 m ³ /s
T _i	22,9 °C
α_{isol}	80W/m ² .K

As simulações dos modelos foram realizadas no ambiente do Matlab. Para tanto foi utilizado o pacote de integração numérica ODE45.

A validação quantitativa do desempenho dos modelos simulados é realizada usando a função custo:

$$\epsilon = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [y(kT_s) - \hat{y}(kT_s)]^2, \quad (16)$$

onde N é o número de pontos no tempo, $y(kT_s)$ é a saída real do processo e $\hat{y}(kT_s)$ é a saída do modelo.

4.1 Temperatura do líquido no Tanque 2

Na simulação do modelo do Tanque 2, representado pela Equação (10), o ponto de operação selecionado foi uma temperatura inicial e temperatura ambiente de aproximadamente 22,9°C e a quantidade de energia ($Q_{elétrico}$) igual a zero, ou seja, o PWM igual a zero. Com o sistema estável no ponto de operação escolhido, o valor do PWM foi alterado para 20%, ou seja, 800J. Na Figura 6 é apresentada as curvas obtidas a partir da planta didática real e o resultado da simulação para o ponto de operação selecionado.

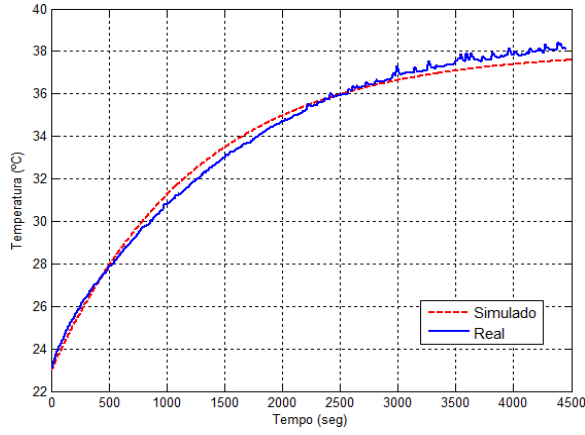


Figura 6: Curvas das respostas real e simulada para a Temperatura do Tanque 2.

Ao analisar as curvas apresentadas na Figura 6 observa-se que o modelo simulado é capaz de representar a dinâmica real da temperatura do Tanque 2 da planta didática. O erro médio quadrático (ϵ) entre as curvas do modelo simulado e a temperatura real do Tanque 2 é de 0,1499.

Uma das razões que provocaram o erro é o fato da água do Tanque 1 ser resfriada por um radiador simples sem controle preciso de temperatura. Assim não é possível garantir que a temperatura inicial da água que entra no Tanque 2 seja constante. Esta condição não foi levada em consideração durante o desenvolvimento do modelo.

4.2 Nível do líquido no Tanque 3

Na simulação do modelo do Tanque 3, representado pela Equação (15), considera-se fluxo laminar, ou seja, $x = 1$. A escolha do fluxo laminar é de acordo com a observação do comportamento do fluxo de saída da planta didática real.

A resistência ao escoamento (β) é determinada a partir do fluxo na saída da planta didática real através da relação:

$$\beta = \frac{F_{ee}}{h} \quad (17)$$

onde F_{ee} é a vazão no estado estacionário.

Para validação experimental do simulador foi escolhido o seguinte ponto de operação da planta real: altura da coluna de líquido inicial $h = 0,427m$, abertura da válvula $V1 = 75\%$. Com essa configuração o nível do Tanque 3 permanece estável e os dados da entrada e saída do sistema passam a ser coletados.

É aplicado um degrau com amplitude de -10% na válvula da saída, ou seja, $V1 = 65\%$. Após o regime permanente atingido, o experimento é finalizado.

Na Figura 7 é apresentada as curvas da resposta ao degrau da planta didática real e do modelo simulado para o ponto de operação descrito.

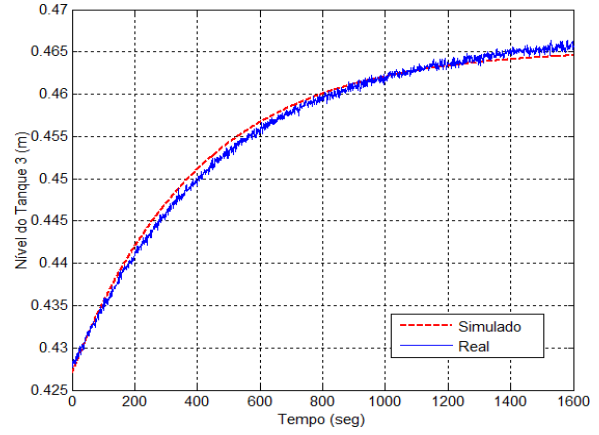


Figura 7: Curvas das respostas real e simulada para o nível do Tanque 3.

Ao analisar as curvas apresentadas na Figura 7 observa-se que o modelo simulado é capaz de representar a dinâmica real do nível do Tanque 3 da planta didática. O erro médio quadrático (ϵ) entre as curvas do modelo simulado e o nível real do Tanque 3 é de $7,6382 \times 10^{-7}$.

5 Identificação e Controle da planta

Uma vez que o comportamento físico da planta didática é compreendido por meio da modelagem e simulação, são identificados os modelos simplificados para as malhas de nível e temperatura. Tais modelos lineares são utilizados no projeto de controladores PID.

A partir dos dados coletados nos experimentos descritos nas seções 4.1 e 4.2, são identificados modelos *First Order Plus Time Delay* (FOPTD) conforme a técnica de identificação no domínio do tempo apresentada em Santos e Barros (2010). Os modelos identificados são então utilizados para a sintonia de controladores PID. A seguir os modelos identificados e os controladores projetados são apresentados.

5.1 Temperatura do líquido no Tanque 2

O modelo FOPTD identificado para a malha de temperatura encontra-se na Equação (18).

$$G(s) = \frac{0,443}{1544s + 1} e^{-11,15s} \quad (18)$$

A partir do modelo identificado foi projetado um controlador PID utilizando a técnica de sintonia SIMC (Skogestad, 2003). Os parâmetros do controlador encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3: Valores dos parâmetros PID.

Método	K_p	T_i	T_d
SIMC	6,582	1544,00	0

Na Figura 8 é apresentada a resposta do sistema submetido à entrada degrau unitário e sujeito a sintonia proposta.

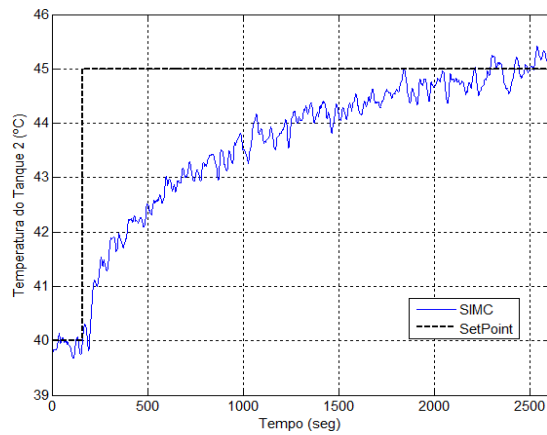


Figura 8: Curvas da resposta ao degrau no setpoint para a temperatura do Tanque 2.

5.2 Nível do líquido no Tanque 3

O modelo FOPTD identificado para a malha de nível encontra-se na Equação (19).

$$G(s) = \frac{-0,8095}{928,2s + 1} \quad (19)$$

A partir do modelo identificado foi projetado um controlador PID utilizando a técnica de sintonia SIMC (Skogestad, 2003). Os parâmetros do controlador encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4: Valores dos parâmetros PID.

Método	K_p	T_i	T_d
SIMC	11,47	400,00	0

Na Figura 9 é apresentada a resposta do sistema em malha fechada submetido à entrada degrau unitário.

6 Conclusões

A modelagem matemática de sistemas dinâmicos é de fundamental importância para a compreensão dos fenômenos presentes em uma planta real. Tal conhecimento facilita as decisões no projeto de controle, assim como permite simulações de diversos cenários.

Nesse trabalho foram realizadas tanto a modelagem e simulação da planta como a identificação de modelos FOPTD específicos para um dado ponto de operação. Com base nesses modelos foram propostas sintonias para controladores PID nas malhas de nível e temperatura.

Todas as técnicas abordadas nesse trabalho ilustram o potencial da planta didática para as

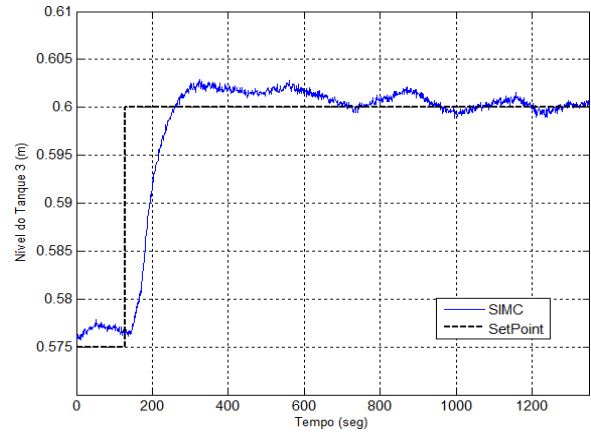


Figura 9: Curva da resposta ao degrau no setpoint para o nível do Tanque 3.

diversas atividades de ensino e pesquisa na área de controle e automação.

Referências

- Astrom, K. J. e Hagglund, T. (2006). *Advanced pid control*, nc 27709 edn, Instrument Society of America: Research Triangle Park.
- Bequet, B. W. (1998). *Process dynamics: modeling, analysis, and simulation*, 1 edn, Prentice-Hall International.
- Ljung, L. (1999). *System Identification: Theory for the User*, 2ed edn, Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Ribeiro, M. A. (1999). *Válvulas de Controle e Segurança*, 5 edn, Salvador, BA.
- Roffel, B. e Betlem, B. (2006). *Process Dynamics and Control: modeling for control and prediction*, 1 edn, John Wiley & Sons Ltd.
- Santos, J. B. M. e Barros, P. R. (2010). Simple identification techniques for first-order and second-order systems, *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, Bonito, MS.
- Skogestad, S. (2003). Simple analytic rules for model reduction and pid controller tuning, *Journal of Process Control* **13**: 291–309.
- SMAR (2015). *PD3-P - Manual de Instruções, Operação e Manutenção.*, 3 edn, SMAR.
- Soderstrom, T. e Stoica, P. (1989). *System Identification*, 1 edn, Prentice-Hall, London.