



ESTIMATIVA DO MODELO DINÂMICO DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO

F. M. SIVIERI¹, E. P. TEIXEIRA²

^{1,2} Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Química

RESUMO – Métodos de identificação de sistemas dinâmicos têm sido muito utilizados em várias aplicações práticas da engenharia, ajudando na resolução de problemas complexos na indústria. Devido às diversas características que envolvem sistemas multi-variáveis, usamos um identificador linear para estimar as concentrações do topo e da base de uma coluna de destilação genérica, considerando-se como entradas a vazão de vapor injetado no trocador de calor do refeedador e a vazão de reciclo. Justifica-se o uso de modelos lineares, considerando-se que, na prática, trabalha-se em faixas muito estreitas em torno do ponto de operação da coluna. Dentro dessas faixas, os modelos lineares mostram-se bastante precisos. A obtenção dos conjuntos de dados de entrada e de saída, necessários para se proceder a identificação do sistema, foi feita com base em um modelo teórico de uma coluna de destilação binária genérica. Na prática, esses dados deverão ser obtidos diretamente do processo industrial. O toolbox ident do sistema Matlab foi utilizado para identificação do modelo preditivo. Os detalhes da simulação, assim como os resultados do processo de identificação são apresentados.

1. INTRODUÇÃO

Devido à grande complexidade existente nas equações que determinam o comportamento dos processos das indústrias químicas, a utilização de leis físicas na modelagem desses sistemas torna-se impraticável, em muitos casos. Para solucionar esse problema, usa-se um considerável esforço computacional na identificação desses sistemas com base em dados de entrada e de saída dos processos. Desta maneira, as técnicas de identificação de sistemas se fazem necessárias para a construção destes modelos.

Para obtenção de modelos matemáticos para sistemas dinâmicos, a partir do estudo das relações existentes entre as variáveis de entrada e de saída, lineares ou não lineares, usa-se a área do conhecimento denominada estimativa ou identificação de sistemas. A partir destes modelos, realizam-se experimentos que reproduzem o comportamento dos sistemas reais (Aguirre, 2007).

Pode-se realizar a estimativa do modelo dinâmico, em tempo real, ou em batelada. Grandes tempos de resposta e parâmetros que variam lentamente, normalmente aparecem em boa parte dos



processos químicos industriais. Por esse motivo, a identificação off-line torna-se necessária, mesmo quando o objetivo é a síntese de controladores adaptativos ou preditivos. A identificação off-line dá ao projetista a possibilidade de conhecer e entender a dinâmica de um determinado sistema, replicando seu comportamento real, por meio de um conjunto de dados experimentais.

Neste artigo, é efetuada a identificação de uma coluna de destilação binária. A obtenção dos conjuntos de dados de entrada e de saída, necessários para se proceder a identificação do sistema, foi feita com base em um modelo teórico de uma coluna de destilação binária genérica encontrada em *Multivariable Feedback Control - Analysis and Design* (Skogestad e Postlethwaite, 2007). Na prática, esses dados deverão ser obtidos diretamente do processo industrial. O *toolbox ident* do sistema *Matlab* foi utilizado para identificação do modelo preditivo. Os detalhes da simulação, assim como os resultados do processo de identificação são apresentados na seção 4 deste trabalho. Inicialmente, apresenta-se um breve resumo dos princípios de operação de colunas de destilação binárias.

2. COLUNAS DE DESTILAÇÃO

A destilação é uma operação unitária bastante utilizada na indústria química e de petróleo para separar componentes químicos em produtos purificados. A separação das fases de uma mistura líquido-líquido é realizada através das diferenças das composições voláteis, que determinam a tendência a se vaporizar, entre componentes químicos da mistura. O componente com menor ponto de ebulição, ou seja, mais volátil é denominado destilado, sendo que o outro, com maior ponto de ebulição, ou menos volátil, é chamado resíduo ou produto de fundo. Quando é fornecido calor à mistura, a substância mais volátil vaporizará primeiro. Para a realização deste processo é exigida uma grande quantidade de energia, o que pode envolver cerca de 30 a 40% do total de recursos gastos com energia (Yang e Lee, 1997), em processos comuns às indústrias químicas. As colunas de destilação necessitam de sistemas de controle capazes de manter o processo estável e o mais eficiente possível. Sendo assim, as técnicas de identificação, apresentadas neste trabalho, visam auxiliar o projeto de tais controladores.

Apesar dos projetos de plantas de destilação atuais serem capazes de apresentar grande eficiência no processo de separação, no que se refere à eficiência energética têm-se resultados muito baixos. O controle preciso e robusto de colunas de destilação ajudaria a aumentar a rentabilidade da planta por meio da economia de energia e da melhora na recuperação do produto final.

2.1. Processo de Destilação

A destilação usada para separar dois produtos com diferentes composições é a denominada binária. Essa operação consiste em separar uma mistura composta por dois líquidos puros, com diferentes pontos de ebulição (volatilidades diferentes). Ao aquecermos a mistura, a temperatura deve ficar entre os respectivos pontos de ebulição, os componentes mais voláteis (leves ou destilado) são removidos na parte superior da coluna, e os componentes menos voláteis (pesados ou resíduo) são



removidos a partir da parte mais inferior da coluna, como mostra a Figura 1. Por exemplo, uma mistura de etanol e água pode ser separada por destilação, porque o etanol é mais volátil do que a água.

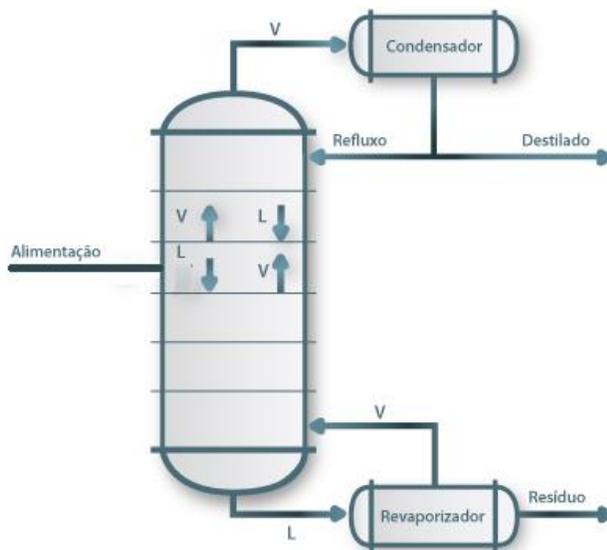


Figura 1: Esquema de uma coluna de destilação

Fonte: http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?Itemid=143&id=67&option=com_content&task=view

Na coluna apresentada na Figura 1, ocorre a separação, onde o calor é adicionado ao sistema no refeedor (base da coluna) e removido pelo condensador (topo da coluna). Um fluxo de vapor, partindo do refeedor, se desloca em direção do condensador, e o líquido que fica armazenado no tambor de refluxo, localizado na parte superior da coluna, desloca-se na direção do refeedor. Quando ocorre o contato entre o vapor e o líquido do refluxo, o componente volátil é enriquecido na fase de vapor e o componente mais pesado é concentrado na fase líquida (Lundström e Skogestad, 1995).

A coluna de destilação binária apresenta algumas vantagens, como, operação simples, baixo investimento inicial quando comparada com outros processos de separação e, muitas vezes, é considerado um processo com baixo risco operacional. No processo de destilação a separação de componentes com volatilidade relativa acima de 1,2, torna-se difícil de ser superado pelos métodos de separação mencionados. Uma desvantagem no processo de destilação é a baixa eficiência energética e a necessidade de estabilidade térmica por parte dos componentes em seus pontos de ebulição.

2.2. Componentes de uma coluna de destilação

Existem vários componentes em uma coluna de destilação e cada um é usado para fazer a transferência de energia térmica, melhorando o material. Pode-se enumerar alguns componentes de uma coluna típica de destilação.

- Vaso vertical onde é realizada a separação do componente líquido;
- Componentes internos da coluna, tais como as bandejas utilizadas para aumentar a



separação de componentes;

- Refervedor para proporcionar a vaporização necessária para o processo de destilação;
- Condensador para resfriar e condensar o vapor que deixa o topo da coluna;
- Tambor de reciclo para segurar o vapor condensado a partir do topo da coluna de modo que o líquido (reciclo) possa ser reciclado para a coluna.

O diagrama de um sistema de destilação de etanol típico, formado por três colunas, em série, é mostrado na Figura 2.

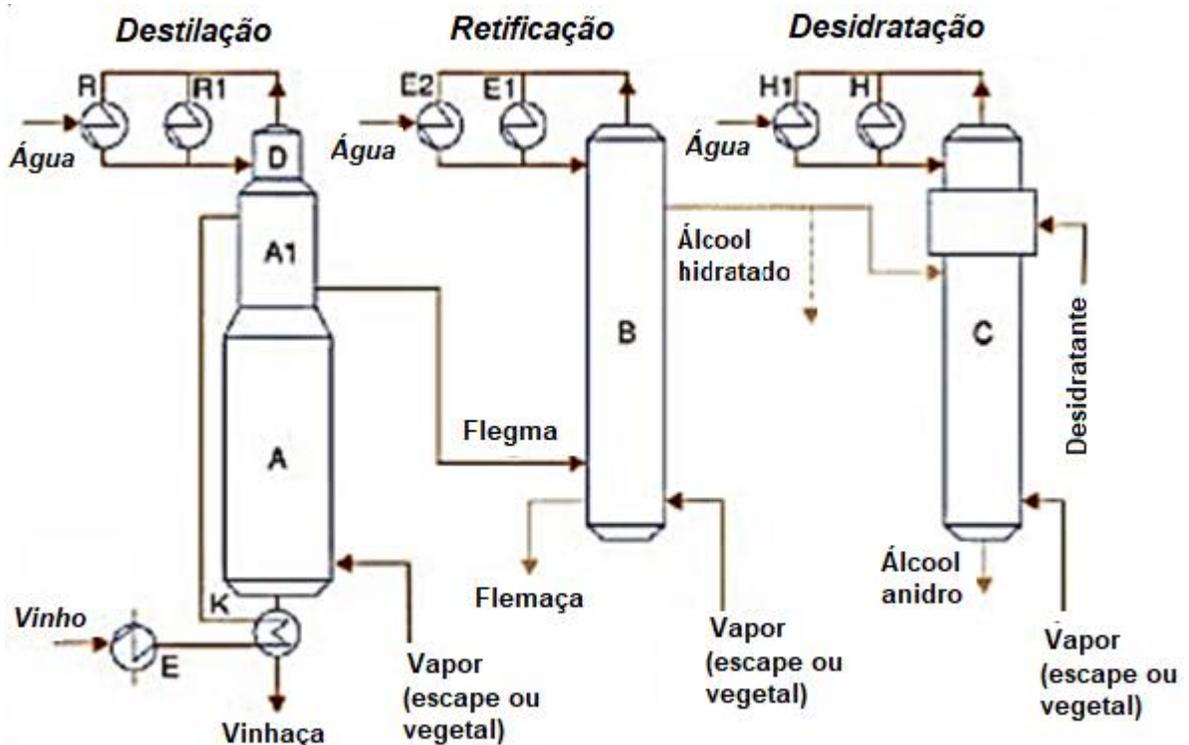


Figura 2: Diagrama de uma coluna de destilação típica
Fonte: <http://mundodacana.blogspot.com.br/2009/09/>

2.3. Princípio de Funcionamento

Dentro do recipiente cilíndrico, que forma a parte principal da coluna de destilação, existe uma série de pratos por onde circulam vapor e líquido em sentidos contrários, formando com isso uma coluna de destilação. São feitas transferências de calor e massa em cada andar e ficam em equilíbrio ao deixar o andar nessas duas fases. Na parte superior da coluna fica o condensador que faz a

condensação do vapor que chega da coluna e forma o produto de topo, sendo uma parte desse produto (condensado) separado para refluxo e enviado novamente para o prato superior da coluna.

Na parte inferior da coluna fica o refeedor onde se faz a vaporização de parte da corrente da base, para o prato inferior da coluna, com isso entrando na coluna sobre a forma de vapor. O resíduo (ou produto de fundo) é a parte da corrente que fica retida na base da coluna. O vapor reinjetado na coluna tende a subir, mas devido a geometria dos pratos (desenhados para maximizar o contato vapor/líquido) é obrigado a fluir através do líquido que desce. O vapor em contato com o líquido tem a tendência a condensar, os componentes menos voláteis.

O calor liberado permite que os componentes mais voláteis do líquido sejam vaporizados. Desta forma, a corrente de vapor (que sobe) vai ficando cada vez mais rica no componente mais volátil, enquanto a corrente de líquido vai ficando cada vez mais rica no componente menos volátil. O refluxo do vapor condensado no topo da coluna define a qualidade de separação das misturas, mas existe um compromisso entre qualidade e produtividade.

Os pratos da coluna de destilação é que fazem o contato entre as fases em cada andar em equilíbrio. Existem vários tipos de pratos usados na coluna, que podem ser perfurados, de válvulas, campânula etc. A Figura 3 mostra um modelo de prato usado nas colunas de destilação.

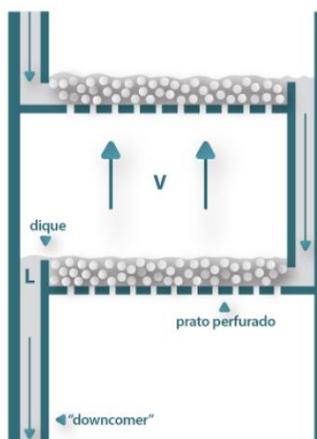


Figura 3: Visão do prato em uma coluna de destilação

Fonte: http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?Itemid=143&id=67&option=com_content&task=view

Do ponto de vista de controle, a coluna de destilação binária pode ser observada como um sistema multivariável (MIMO) 5x5, que corresponde a cinco variáveis que podem ser manipuladas para o controle, que são:

- Vazão de refluxo L ;
- Vazão de vapor V proporcional à troca de calor com o refeedor Q_B ;
- Vazão do destilado D_L ;



- Vazão do produto de fundo B_L ;
- Vazão do condensador C responsável pela retirada de calor.

E cinco variáveis controladas, que são:

- Pressões na base, intermediária ou no topo P;
- Nível do refeedor L_B ;
- Nível do tanque de refluxo L_D ;
- Composição do produto de fundo y_B ;
- Composição do produto de destilado y_D .

Existe um grande número de possibilidades que podem ser usadas como estratégias empregadas no controle de colunas de destilação.

As colunas de destilação, na prática, são controladas de forma hierárquica, primeiro são projetados os controladores para o nível e pressão. Nas malhas de controle com múltiplas entradas e saídas, normalmente, a pressão e os níveis são regulados no tanque de refluxo e refeedor, com isso é mantido o estoque de materiais, garantindo uma operação segura da coluna e evitando a ocorrência de drenagens e inundações (Luyben, 1992). Outro detalhe é que as dinâmicas das malhas de controle das composições e dos níveis são desacopladas, sendo que os controles de qualidade dos produtos de fundo e do topo são simplificados por meio da redução do modelo da coluna para um sistema MIMO 2x2 (Skogestad *et al.*, 1990; Luyben, 1992).

A seguir, descreve-se o método utilizado para estimativa do modelo dinâmico da coluna.

3. ESTIMATIVA DO MODELO PREDITIVO LINEAR DA COLUNA DE DESTILAÇÃO

O dimensionamento é muito importante em aplicações práticas, pois torna a análise do modelo e o design do controlador (seleção de peso) muito mais simples. Exige que o engenheiro faça um julgamento no início do processo de design sobre o desempenho exigido do sistema. Para fazer isso, são tomadas decisões sobre as magnitudes esperadas de distúrbios e mudanças de referência, na magnitude permitida de cada sinal de entrada e no desvio permitido de cada saída.

Foi usado para o desenvolvimento deste trabalho os dados resultantes da simulação do modelo de uma coluna binária apresentada em (Skogestad e Postlethwaite, 2007). Esse modelo consiste em uma função de transferência de primeira ordem com entradas L, V e saídas y_D , y_B (Figura 4).

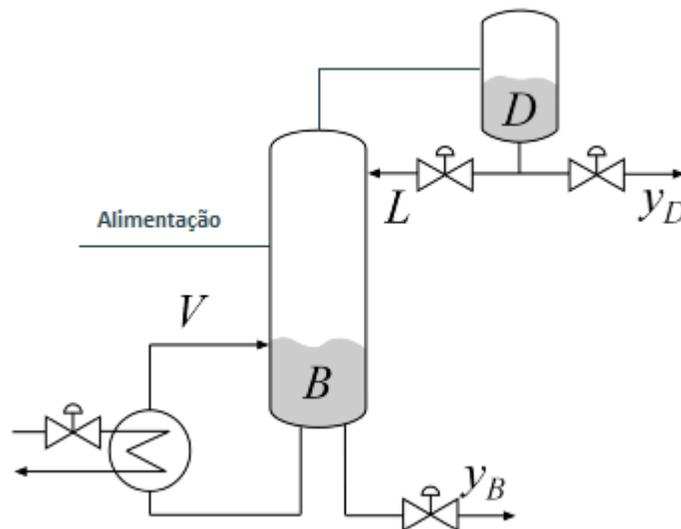


Figura 4: Coluna de Destilação
Fonte: Skogestad e Postlethwaite, 2007

Para essa configuração, as concentrações y_D e y_B , referentes aos produtos químicos D (produto de topo) e B (produto de fundo), são as variáveis controladas. A taxa de reciclo e a vazão de vapor do refeedor V são as variáveis manipuladas. Este processo exibe forte acoplamento e grandes variações em ganhos em regime estacionário para algumas combinações de L e V. Para mais detalhes, veja (Skogestad e Postlethwaite, 2007).

4. DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS DA ESTIMATIVA DA COLUNA DE DESTILAÇÃO

A equação dinâmica da coluna de destilação pode ser gerada com características preditivas, ou seja, com base nos dados de entrada atuais obtidos diretamente do processo, inferem-se os valores que ocorrerão na saída, nos próximos instantes de amostragem. Este é a principal ferramenta para a implementação de controladores preditivos. Desta forma, os resultados obtidos neste trabalho, deverão ser utilizados em trabalhos posteriores de controle preditivo de colunas de destilação.

Para se efetuar a estimativa do modelo dinâmico da coluna de destilação, foram gerados dados correspondendo as grandezas:

Entrada:

- Vazão de vapor na entrada do refeedor (range de 0 a 1200 Kg/h)
- Abertura da válvula de reciclo (range de 0 a 100%)

Saída:



- Concentração do produto de topo (range de 0 a 100%)
- Concentração do produto de fundo (range de 0 a 100%)

Esses dados foram escalados para a faixa de (-20 a +20), para facilitar o processo de estimativa.

Foram gerados dois conjuntos de dados com intervalo de amostragem de 1 segundo, sendo o conjunto A, correspondente aos dados de treinamento e o conjunto B aos dados de validação. Esses dados foram obtidos por meio do *toolbox simulink*, gerando-se valores aleatórios, a partir das funções de transferência definidas em (Skogestad e Postlethwaite, 2007).

Várias tentativas de simulação foram realizadas, sendo, a que mostrou melhores resultados foi o modelo de estado de ordem 8:

$$\dot{x} = Ax + Bf$$

$$y = Cx$$

Sendo:

\dot{x} : derivada de x em relação ao tempo $\left(\frac{dx}{dt}\right)$

x : vetor de estado, $x \in \mathbb{R}^8$

A : matriz de estado 8×8

B : matriz de entrada 8×2

f : vetor de entrada ($f \in \mathbb{R}^2$) corresponde a vazão de vapor do refeedor e a porcentagem de reciclo

y : vetor de saída ($y \in \mathbb{R}^2$) corresponde as concentrações de topo e de fundo

C : matriz de saída 2×8

No processo de identificação, as matrizes A, B e C foram estimadas e estão apresentadas nas Figuras 6, 7 e 8.



| A = | | | | | | | | |
|-----|--------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | x1 | x2 | x3 | x4 | x5 | x6 | x7 | x8 |
| x1 | 3.751 | 155.6 | 6.221 | 11.44 | 12.98 | -84.74 | -14.71 | -41.65 |
| x2 | 100.3 | 4161 | 164.3 | 306.4 | 345.9 | -2264 | -391.9 | -1113 |
| x3 | 140.6 | 5827 | 226.6 | 430.4 | 482.5 | -3167 | -545.9 | -1557 |
| x4 | -322 | -1.335e+04 | -527.8 | -983 | -1110 | 7265 | 1259 | 3571 |
| x5 | -81.54 | -3376 | -126.9 | -252.3 | -277.4 | 1828 | 311 | 898.7 |
| x6 | 101.1 | 4196 | 167.8 | 307.7 | 349.8 | -2286 | -397.5 | -1124 |
| x7 | 101.3 | 4207 | 171.6 | 306.7 | 352.7 | -2297 | -402.4 | -1129 |
| x8 | 41.54 | 1719 | 62.68 | 129.3 | 140.3 | -928.4 | -156.3 | -456.8 |

Figura 6: Dados das matrizes A
Fonte: Imagem do software Matlab

| B = | | |
|-----|--------|--------|
| | u1 | u2 |
| x1 | 1.046 | -1.048 |
| x2 | 28 | -28.04 |
| x3 | 39.25 | -39.29 |
| x4 | -89.82 | 89.96 |
| x5 | -22.76 | 22.78 |
| x6 | 28.22 | -28.26 |
| x7 | 28.25 | -28.3 |
| x8 | 11.61 | -11.61 |

Figura 7: Dados das matrizes B
Fonte: Imagem do software Matlab

| C = | | | | | | | | |
|-----|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | x1 | x2 | x3 | x4 | x5 | x6 | x7 | x8 |
| y1 | 380 | -7.26 | 0.8163 | -13.1 | -6.333 | 1.156 | -1.055 | -2.748 |
| y2 | 480.2 | -9.737 | 3.471 | -14.39 | -12.21 | 3.906 | -1.593 | -10.11 |

Figura 8: Dados das matrizes C
Fonte: Imagem do software Matlab

Para comprovar a eficácia do modelo obtido, os dados de validação foram aplicados em dois testes distintos:

TESTE DE SIMULAÇÃO:

Neste teste, os valores das variáveis de estado obtidos por simulação no instante atual, são utilizados para o cálculo da simulação do instante posterior. A Figura 9 mostra a grandeza real e a simulada em um mesmo gráfico. Pode-se comprovar a eficácia do modelo, tanto visualmente, pois torna-se difícil visualizar as duas funções, como numericamente, visto que se obteve uma taxa de acerto de 93,64%, conforme mostrado na Figura 10.

Este tipo de modelo é, em geral, usado para simulação e análise do processo, com vistas ao projeto de controladores.

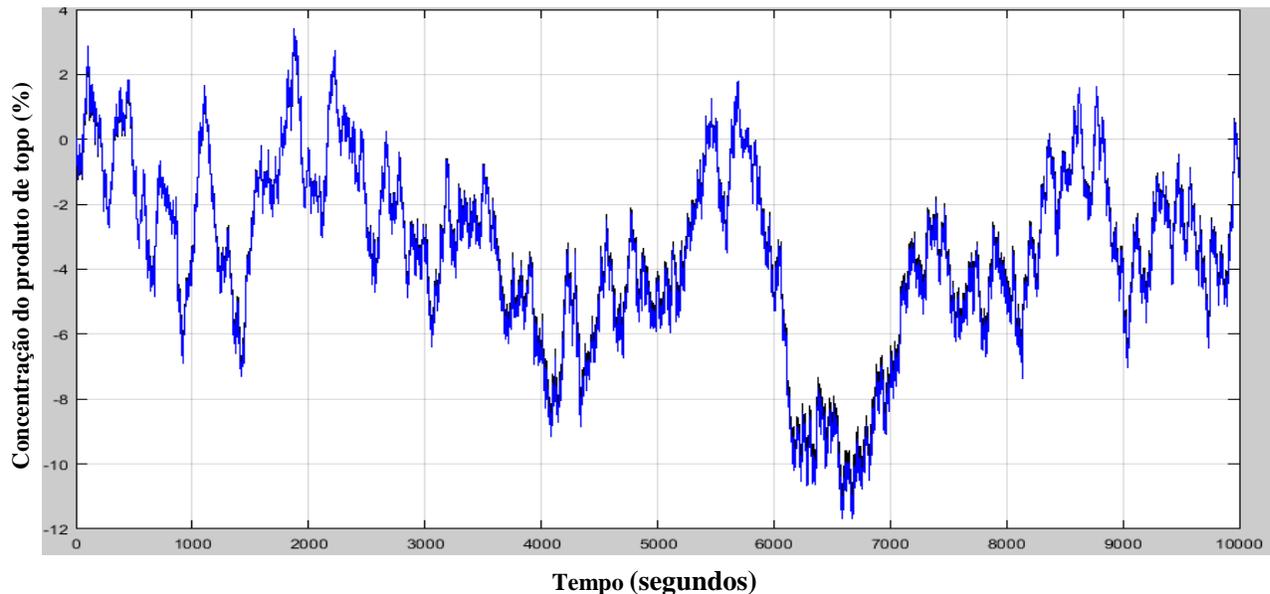


Figura 9: Comparação do resultado de simulação com os dados usados para validação do modelo.
Fonte: Imagem do software Matlab

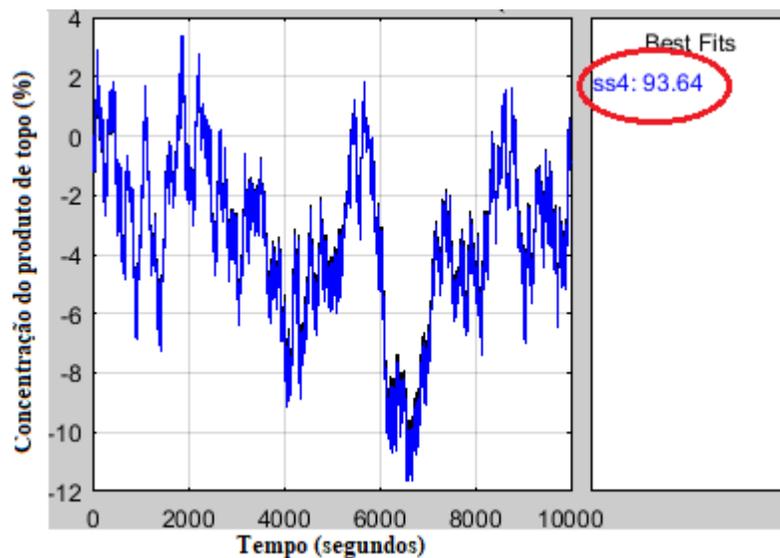


Figura 10: Taxa de acerto na simulação com os dados usados para validação do modelo.
Fonte: Imagem do software Matlab

TESTE DE PREVISÃO:

Neste teste, utilizam-se as grandezas medidas no instante atual, no próprio processo, para se inferir os valores que ocorrerão na saída nos próximos instantes (Figura 11). Desta forma, não ocorre acúmulo de erro, obtendo-se uma maior taxa de acerto. No caso deste trabalho obteve-se 99,45%, conforme pode ser observado na Figura 12.

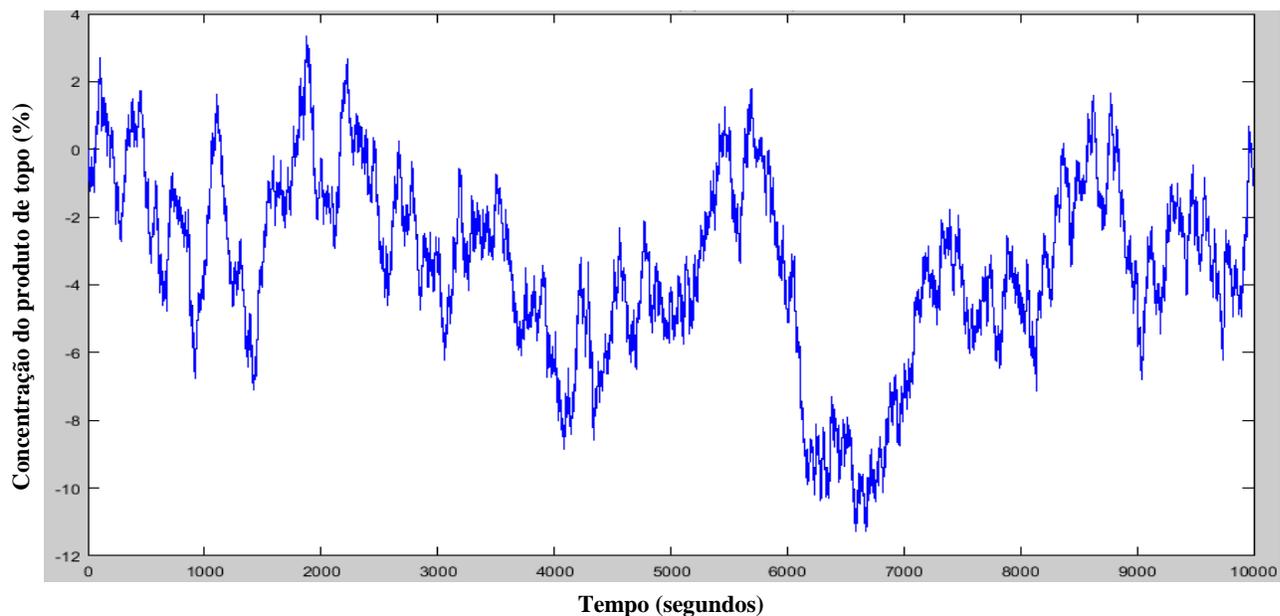


Figura 11: Comparação do resultado de previsão com os dados usados para validação do modelo.

Fonte: Imagem do software Matlab

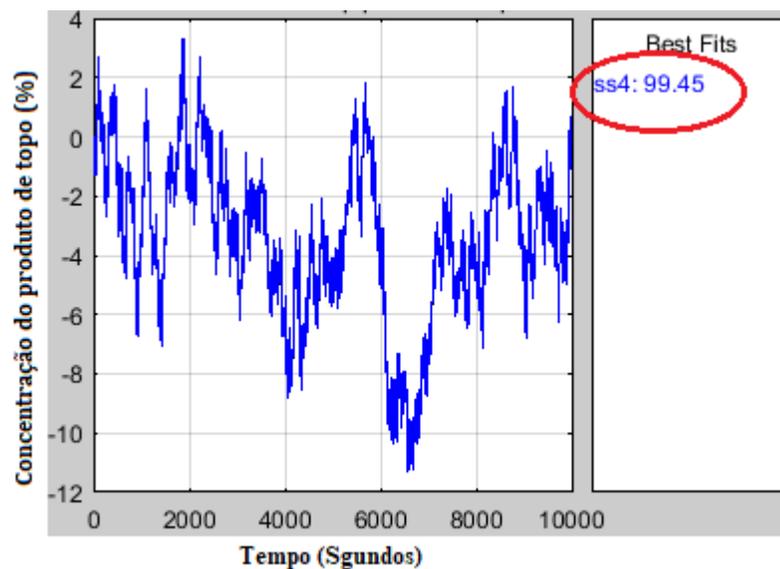


Figura 12: Taxa de acerto na previsão com os dados usados para validação do modelo.

Fonte: Imagem do software Matlab

Este tipo de modelo é utilizado em estratégias de controle preditivo. Para tanto, deve-se também incluir uma rotina de estimativa de estado, onde o vetor x atual é estimado com base no modelo de estado estimado e nas grandezas de saída obtidas do próprio processo. Este processo será objeto de trabalhos futuros.



5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho indicam a viabilidade do uso de modelos lineares para a estimativa da equação dinâmica de colunas de destilação. Principalmente, no caso do modelo de previsão, obteve-se um resultado bastante satisfatório com taxa de acerto de 99,45%. Desta forma, o modelo assim obtido poderá ser aplicado em estratégias de controle preditivo. Embora os dados usados neste trabalho tenham sido obtidos por simulação, espera-se que o uso de dados reais do processo, a ser apresentado em outra publicação, produzam resultados semelhantes.

6. REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. UFMG, 2007. ISBN 9788570415844. Disponível em: < <https://books.google.com.br/books?id=h8u-AQAACAAI> >.

LUNDSTRÖM, P.; SKOGESTAD, S. Opportunities and difficulties with 5×5 distillation control. **Journal of Process Control**, v. 5, n. 4, p. 249-261, 1995/08/01/ 1995. ISSN 0959-1524. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/095915249500017K> >.

LUYBEN, W. L. **Diagonal controller tuning**: Van Nostrand Reinhold: New York 1992.

SKOGESTAD, S.; LUNDSTRÖM, P.; JACOBSEN, E. W. Selecting the best distillation control configuration. **AIChE Journal**, v. 36, n. 5, p. 753-764, 1990. ISSN 1547-5905.

SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. **Multivariable feedback control: analysis and design**. Wiley New York, 2007.

YANG, D. R.; LEE, K. S. Monitoring of a distillation column using modified extended Kalman filter and a reduced order model. **Computers & Chemical Engineering**, v. 21, p. S565-S570, 1997/05/20/ 1997. ISSN 0098-1354. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009813549787562X> >.