



# DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO PROCESSO DE REFLUXO DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO DE ETANOL HIDRATADO

**Talita Neves Duarte<sup>1</sup>, José Vitor Nicacio<sup>2</sup>, Roberto Precci Lopes<sup>3</sup>, Leticia Porcaro Salomão<sup>4</sup> & Danielle Andrade Hatherly<sup>5</sup>**

**RESUMO:** A produção de etanol a partir da cana de açúcar é um processo bastante disseminado no Brasil e ainda muito estudado. O presente trabalho propõe a modelagem experimental do processo de destilação de etanol hidratado em batelada a partir da determinação da função de transferência do condensador de refluxo da coluna. Para a obtenção do modelo foram aplicadas excitações na forma de degrau no sistema. A variável controlada foi definida como a temperatura de saída de vapor do trocador de calor da coluna, e a variável manipulada como a vazão de água de resfriamento do mesmo trocador de calor. As demais variáveis envolvidas no processo foram consideradas distúrbios. Os parâmetros da função de transferência do processo foram satisfatoriamente obtidos e experimentalmente validados. Os valores foram iguais a  $-0,0234 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}/\text{mL}$  para o ganho do processo e a 122 s para a constante de tempo. A modelagem realizada permitirá a implementação de uma estratégia de controle para produção de etanol combustível, visando proporcionar alternativas ao pequeno produtor para a obtenção de produtos de maior qualidade a partir de um processo mais eficiente e econômico, sem que seja necessário recorrer a equipamentos complexos e de alto custo.

**PALAVRAS-CHAVE:** destilação em batelada, modelagem de processos, função de transferência, etanol, controle de processos.

## TRANSFER FUNCTION EXPERIMENTAL DETERMINATION OF A HYDROUS ETHANOL DISTILLATION COLUMN REFLUX PROCESS

**ABSTRACT:** Sugar cane ethanol production is well disseminated in Brazil and it is still widely studied. This work proposes an experimental modeling of hydrous ethanol batch distillation column through the transfer function determination of the column reflux condenser. Aiming to model, step disturbances were applied to the system. The control variable was determined as the heat exchanger outlet temperature of the vapor produced on the top of the column and the manipulated variable consisted of the cooling water flux of the same heat exchanger. Other variables were considered disturbs. The transfer functions parameters were satisfied obtained and experimentally validated. These values were  $-0,0234 \text{ }^{\circ}\text{C s mL}^{-1}$  for the steady-state gain and 122 s for the time constant. This model will allow the implementation of a simple control for small scale distillation column ethanol fuel production. Therefore, alternatives are given to small farmers in order to allow the production of higher quality products through a more efficient and economic process without the necessity to use more complex and expensive equipments.

**KEYWORDS:** batch distillation, process modeling, transfer function, ethanol, control process.

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de etanol como forma alternativa de combustível vem ganhando destaque mundialmente. O etanol produzido a partir da cana de açúcar apresenta algumas vantagens se comparado a outros combustíveis. Entre essas vantagens pode-se destacar o fato de se tratar de um produto proveniente de fonte renovável, que pode ser produzido localmente e, em alguns casos, de forma mais econômica que o petróleo (SILVA, 2007).

<sup>1</sup> Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Química.

E-mail: [talita.nd@hotmail.com](mailto:talita.nd@hotmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental. E-mail: [jose.nicacio@ufv.br](mailto:jose.nicacio@ufv.br)

<sup>3</sup> Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental. E-mail: [roberto.precci@ufv.br](mailto:roberto.precci@ufv.br)

<sup>4</sup> Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Química.

E-mail: [leticiapsalomao@gmail.com](mailto:leticiapsalomao@gmail.com)

<sup>5</sup> Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Química.

E-mail: [hatherly.dani@gmail.com](mailto:hatherly.dani@gmail.com)

O processo de destilação eficaz em pequena escala é muitas vezes dificultado pela falta de acesso a equipamentos e sistemas de controle mais apurados pelos produtores de cana de açúcar e de cachaça. Há, portanto, a necessidade de um sistema de controle simples e acessível, visando diminuir o gasto de energia e a quantidade de água de resfriamento utilizada no processo, bem como a melhoria na qualidade dos produtos.

Após a colheita da cana, extração do caldo e fermentação, o etanol é obtido por meio da destilação. Este método de separação é o mais comum e mais utilizado na indústria. O processo baseia-se no princípio de volatilidade relativa e diferença de ponto de ebulição dos componentes de uma mistura, podendo ser conduzido de forma contínua, em batelada ou semi-batelada (STOJKOVIC, GERBAUD e SHCHERBAKOVA, 2017). A destilação em batelada apesar de ser um processo antigo e ter menor eficiência térmica que a destilação contínua ainda é muito utilizada devido a sua grande versatilidade e menor custo. Torna-se, portanto, ideal para pequenas produções de diferentes produtos ou produtos com composições variáveis (LOPES, 2010).

Para que estratégias de controle clássico possam ser implementadas é necessário o conhecimento da dinâmica do processo, ou seja, como a variável manipulada se relaciona com a variável controlada em estudo. Para isso, deve-se obter um modelo que represente a operação em questão, que pode ser classificado como: teórico, experimental ou híbrido. Os modelos experimentais se destacam por serem de fácil obtenção e são comumente chamados de modelos “caixa preta”, pois as variáveis de entrada e saída são conhecidas, mas o funcionamento da “caixa” não. A grande desvantagem destes modelos está na imprecisão quando extrapolados das condições do processo utilizadas na modelagem (SEBORG, 2004).

O modelo utilizado pode ser expresso por meio de uma função de transferência, que relaciona a variável de saída com a variável de entrada e pode ser, por exemplo, de primeira ordem, dada por:

$$G(S) = \frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{K_p}{\tau_p S + 1}, \quad (1)$$

em que  $G(s)$  é função de transferência,  $Y(s)$  é a variável de saída,  $U(s)$  é a variável de entrada,  $K_p$  é a constante de ganho do processo e  $\tau_p$  é a constante de tempo.

Diversos tipos de modelagem e controle de colunas de destilação são estudados na literatura. Gehlen et al (2015) utilizou modelos termodinâmicos em seu trabalho para inferir a concentração do produto de topo com base nos valores de temperatura, utilizando o supervisor Elipse SCADA e o programa Matlab. Ketzner (2013) determinou modelos matemáticos do sistema dinâmico a partir de dados experimentais do processo de destilação a partir de modelos discretos, utilizando também o programa Matlab. Carvalho e Felipe (2007) realizaram a

modelagem de uma coluna de destilação a partir de modelos autorregressivos. Já Barros e Almeida (2009) aplicaram o controle Fuzzy para controlar a temperatura de topo de uma coluna de destilação didática.

O objetivo deste trabalho foi modelar a coluna de destilação experimentalmente por meio de um modelo simplificado, utilizando uma função de transferência de primeira ordem para representar a dinâmica do condensador de refluxo da coluna. O modelo obtido poderá ser implementado a um controlador para automação do controle da temperatura de destilado final do equipamento em questão, garantindo assim, uma maior concentração de etanol no produto e, portanto, uma maior qualidade do mesmo.

## 2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 MÓDULO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados no sítio Santa Luzia, situado na cidade de São Geraldo, Minas Gerais. A propriedade possui parceria com a Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

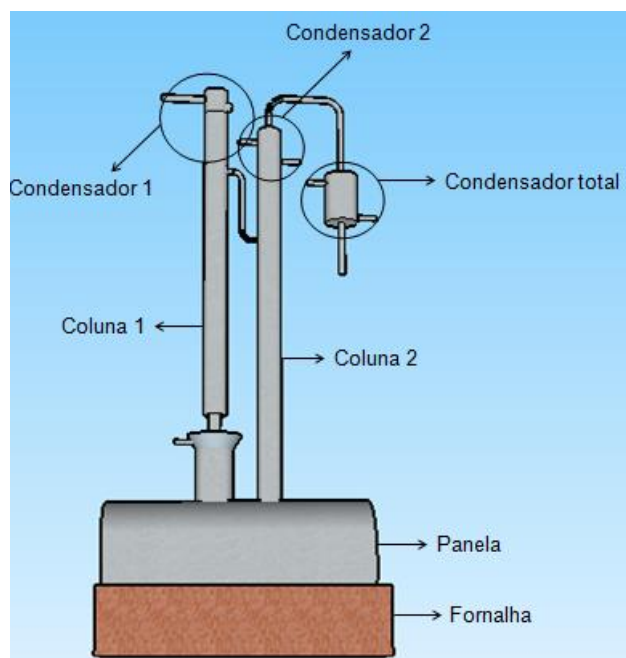
Neste local foi construída uma microdestilaria de etanol que utiliza a cana de açúcar como matéria-prima. Na propriedade há uma estrutura para realização do processo, desde o plantio da cana até a obtenção do etanol hidratado, que é, então, utilizado como combustível em automóveis de funcionários e em equipamentos da própria fazenda como forma de geração de energia. Além disso, parte da produção é utilizada como escambo para a obtenção da matéria-prima de pequenas propriedades vizinhas. É importante destacar que a principal função desta unidade de produção é didática, e não econômica. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** 1 ilustra a coluna em estudo.



**Figura 1** - Coluna de destilação de etanol utilizada no trabalho.

O desenvolvimento do trabalho seguiu os seguintes passos: avaliação das variáveis pertinentes ao processo, instalação de alguns instrumentos de medição para o seu monitoramento, realização de experimentos a fim de obter um modelo experimental e validação do modelo obtido.

A coluna de destilação em estudo está representada na Figura 2. Este equipamento foi construído em aço inox e é composto de duas colunas de recheio em série. Esta configuração foi desenvolvida para evitar a construção de uma coluna com uma altura elevada, o que dificultaria o acesso do operador em caso de necessidade.



**Figura 2** – Representação da coluna de destilação em estudo.

Após as etapas de extração do caldo, fermentação e pré-destilação, o vinho resultante é inicialmente adicionado à panela que foi instalada sobre uma fornalha aquecida diretamente com lenha. Os vapores gerados entram em ambas as colunas. A coluna 1 é recheada com cacos de vidro até determinada altura, a partir da qual está o sistema de condensação 1. Este sistema consiste de um tubo que conduz água até a base inferior do condensador e sobe novamente, saindo da coluna. Os vapores etílicos ao entrarem em contato com a superfície fria deste tubo são condensados, coletados em um funil e encaminhados para a coluna 2, completamente preenchida com recheio. O efluente da coluna 1 encontra com os vapores ascendentes da coluna 2 e enriquece a concentração desses, ou seja, o etanol segue como vapor mais concentrado e a água é condensada. No topo desta coluna está o condensador 2, que consiste de um feixe de tubos. Os vapores da coluna seguem dentro dos tubos e a água de refrigeração por fora. O destilado é retirado no topo desta segunda coluna e, após passar por um condensador total, é obtido em fase líquida a temperatura ambiente.

## 2.2 INSTRUMENTAÇÃO E COLETA DE DADOS

Para obtenção dos valores de temperatura da coluna de destilação foram instalados três sensores: um no topo da coluna 1, um no topo da coluna 2 e um na parte superior da panela. Foram escolhidos para instalação sensores de temperatura LM35DZ, por possuírem baixo custo, faixa de operação adequada, entre 0 e +100 °C, e sinal de saída de tensão proporcional à temperatura em graus Celsius (TEXAS INSTRUMENTS, 2017).

Os sensores foram adaptados em tubos de cobre, preenchidos com pasta térmica e soldados em uma extremidade. A sonda construída pode ser vista na Figura 3.



**Figura 3** - Sonda contendo o sensor de temperatura LM35.

A sonda foi conectada ao módulo registrador acoplado ao computador por um cabo Stereo phillipis 2x0.50 mm com comprimento aproximado de 5 m. O módulo utilizado foi o I-7018 que trata o sinal de entrada internamente. No computador foi implementado um código no software Visual C# da Microsoft e desenvolvida uma plataforma para visualização dos valores medidos na forma de gráfico.

## 2.3 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Foi determinada como variável controlada a temperatura de saída do vapor etílico do condensador 2. A variável manipulada foi a vazão de água de refrigeração que entra no condensador 2. Os demais fatores do processo, como a temperatura da água de resfriamento, a temperatura e a vazão com que os vapores da mistura água/etanol chegam até os condensadores, foram considerados distúrbios.

Nos experimentos realizados, foi adicionada à panela uma carga inicial de, aproximadamente, 250 L da mistura etanol/água com concentração em torno de 60% v/v. Além disso, a adição de lenha foi feita de forma a manter a menor interferência possível da combustão nas variações da temperatura dos vapores de topo. Portanto, adicionou-se quantidade similar de lenha, em torno de 9 kg, em todos os experimentos e em seguida aguardou-se um tempo padrão de, aproximadamente, 10 minutos antes de aplicar o degrau para que a temperatura se estabilizasse.

O termo “registro 1” é referente ao registro que controla a água de resfriamento que entra no condensador 1. Da mesma forma, “registro 2” se refere ao registro que controla a água de resfriamento na entrada do condensador 2.

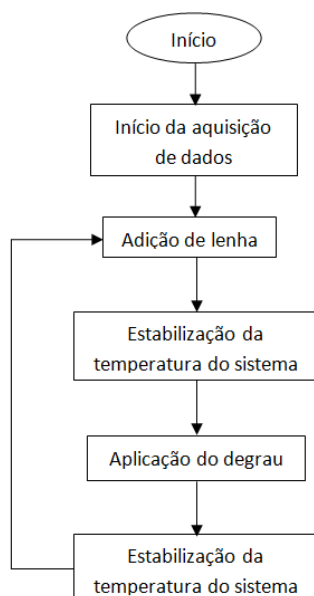
Inicialmente, foi feita uma análise geral do sistema com base nos perfis de temperatura dos pontos onde foram instalados os sensores visando compreender melhor a dinâmica do processo. Para os testes seguintes, somente a temperatura do vapor de destilado final foi analisada, que corresponde ao principal parâmetro de controle do processo.

Para obter a função de transferência do condensador 2 da coluna foram aplicadas perturbações em degrau referentes a valores que correspondem ao intervalo de trabalho do registro 2. A partir do perfil de temperatura de saída dos vapores etílicos foi possível determinar os parâmetros necessários para a caracterização da dinâmica do referido condensador.

Após a obtenção da função de transferência desejada foi feita a validação do modelo. Para isso, simulou-se a aplicação de um degrau utilizando a função de transferência previamente obtida e comparou-se esse resultado com o obtido aplicando o mesmo degrau no módulo experimental.

Também foi obtida a função de transferência para o registro de água de resfriamento do condensador 2 quando o registro do condensador 1 estava parcialmente aberto.

A sequência básica seguida para realização dos experimentos com aplicação de perturbações em degrau é ilustrada no fluxograma da Figura 4.



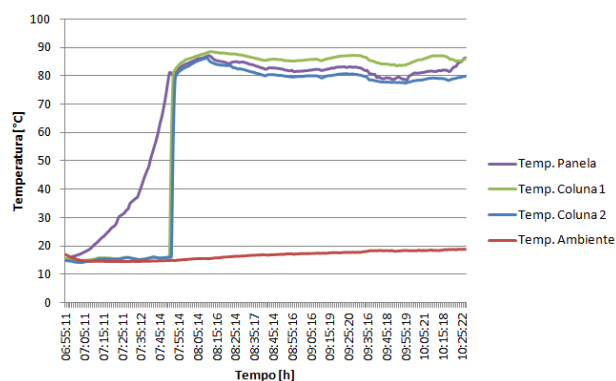
**Figura 4** – Fluxograma do procedimento básico para realização dos experimentos.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 ANÁLISE GERAL DO SISTEMA

A Figura 5 ilustra os valores das temperaturas no topo da coluna 1, no topo da coluna 2 e na panela, além da

medida da temperatura ambiente durante a coleta de dados. Este gráfico nos permite fazer uma análise geral do sistema.

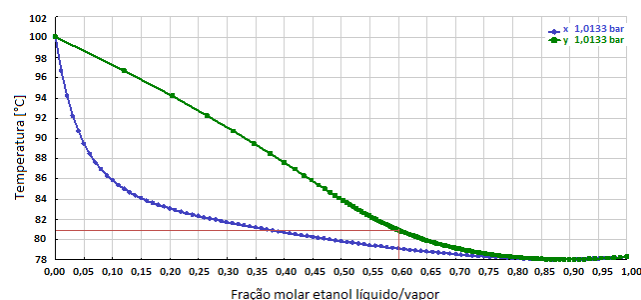


**Figura 5** – Gráfico que representa os perfis de temperatura gerais do sistema.

Pode-se observar que a temperatura da mistura na panela é gradualmente aquecida até atingir o valor de temperatura em torno de 80 °C. Neste momento, os vapores da mistura etanol/água se elevam até o topo das duas partes das colunas e as temperaturas nestes pontos sobem quase instantaneamente.

O valor do ponto de ebulição da mistura pode ser comparado com o valor teórico a partir do diagrama de temperatura e composição da mistura utilizada que é ilustrado na Figura 6. O diagrama foi construído através de dados teóricos do programa Aspen Plus. Analisando este gráfico, a temperatura de ebulição para uma mistura de 60% v/v de etanol é próxima de 81 °C, o que pode também ser observado no gráfico experimental obtido e ilustrado na Figura 5. Este gráfico também nos permite observar o ponto azeotrópico da mistura etanol/água, que limita a separação completa desses dois compostos apenas por destilação. O ponto azeotrópico ocorre na temperatura de 78,15 °C, com fração molar de etanol correspondente a 0,89.

Desta forma, estabelecendo um valor de referência para a temperatura próximo de 78 °C garante-se que o condensado obtido tenha a concentração de etanol máxima que pode ser obtida por destilação.



**Figura 6** – Diagrama T – xy para mistura água/etanol.

Fonte: Aspen Plus.

### 3.2 CARACTERÍSTICA DO REGISTRO

O instrumento para ajuste da vazão de água de resfriamento já instalado na coluna é um registro Deca 1510 HD DN15 (1/2"). Para análise da característica do registro foram realizados testes medindo a vazão deste instrumento em função da porcentagem de sua abertura. A vazão foi medida na saída do condensador com auxílio de uma proveta de 500 mL e de um cronômetro de Smartphone da marca Samsung. Para obtenção dos valores de vazão foi cronometrado o tempo para enchimento de determinado volume de água na proveta. Foram realizadas cinco repetições para seis aberturas diferentes do registro. O perfil obtido para o registro 2 é mostrado na Figura 7.

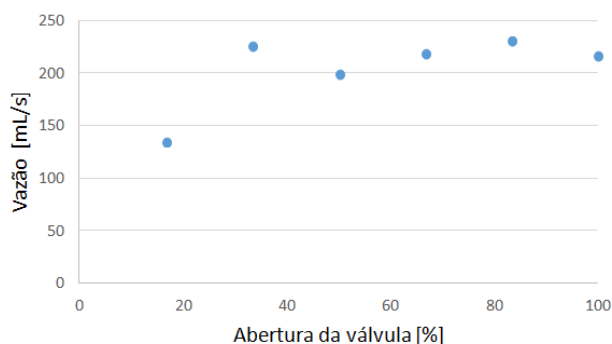


Figura 7 – Perfil de abertura do registro 2.

Observa-se que a vazão máxima do registro é atingida na abertura próxima a 33%. Além disso, a vazão de água tem comportamento semelhante a uma válvula de abertura rápida, atingindo valores altos para pequenas aberturas (RIBEIRO, 1999). Para as demais análises e cálculos, foram usadas as vazões da água de resfriamento e não as porcentagens de abertura das válvulas.

### 3.3 DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA COM O REGISTRO 1 FECHADA

Após essa análise inicial, foram iniciados os testes para obtenção dos parâmetros da função de transferência. A partir de testes preliminares, foi determinado que a vazão de água de resfriamento do registro 2 afetava menos a variável controlada se comparada com o registro 1. Por esse motivo e ainda devido ao fato do registro 2 estar mais diretamente relacionada com a temperatura de saída do trocador de calor 2, foi determinado que esse registro é mais adequada à implementação do controle.

Para o cálculo das constantes da função de transferência do registro 2 foram aplicadas variações na forma de degrau na vazão de água de resfriamento da mesma, mantendo a abertura do registro 1 e os demais parâmetros do sistema constantes.

Em um dos cálculos realizados, aplicou-se o degrau na vazão de água de resfriamento do condensador 2 correspondendo a um incremento no valor de

134,8 mL/s, mantendo o registro 1 fechado. A Figura 8 ilustra a resposta obtida.

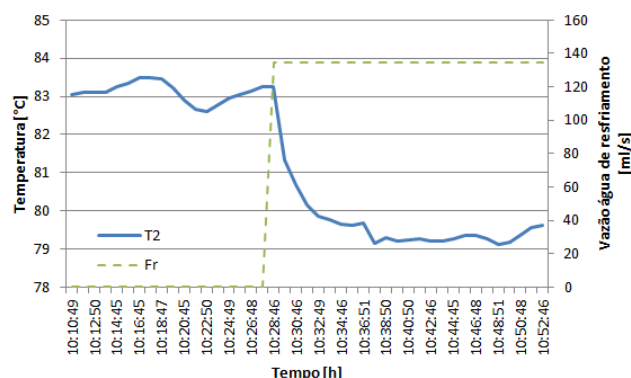


Figura 8 – Gráfico da temperatura do condensado e da aplicação do degrau no registro 2 em função do tempo

Nesse teste, para o cálculo da constante de ganho da função de transferência ( $K_p$ ), foi considerada a variação de temperatura igual a  $-3,82^\circ\text{C}$  e o degrau de 134,8 mL/s, correspondente ao incremento na vazão do registro 2. Essa perturbação é igual a, aproximadamente, uma elevação de 58% da vazão máxima do registro em questão. Desta forma,  $K_p = -0,0283 [^\circ\text{C}\cdot\text{s}/\text{mL}]$ .

A constante de tempo da função de transferência ( $\tau_p$ ) foi calculada considerando o tempo necessário para que a temperatura atingisse 63,2% do valor estacionário final. Nesse caso, aproximadamente, tem-se que  $\tau_p = 111[\text{s}]$ .

O procedimento descrito acima foi repetido para a mesma vazão de água igual a 134,80 mL/s. Em um terceiro experimento foi aplicado um degrau de maior valor de vazão, igual a 225,80 mL/s, correspondente a, aproximadamente, 98% da vazão máxima de água. Os valores das constantes calculadas experimentalmente e suas respectivas médias e desvios padrão são mostrados na

Tabela 1.

Tabela 1 – Valores para as constantes da função de transferência com o registro 1 fechado.

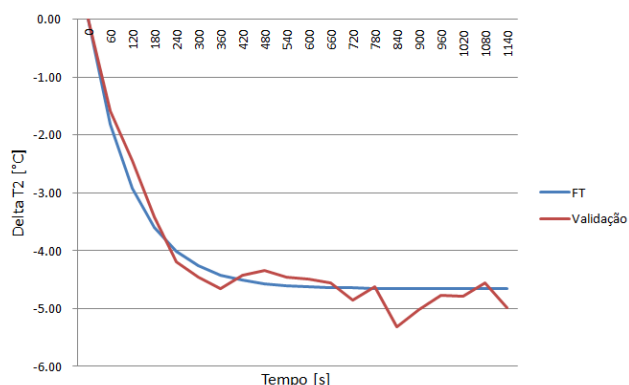
| Abertura V1 [mL/s]   | Degrau V2 [mL/s] | $K_p [^\circ\text{C}\cdot\text{s}/\text{mL}]$ | $\tau_p [\text{s}]$ |
|----------------------|------------------|-----------------------------------------------|---------------------|
| 0                    | 134,80           | -0,0283                                       | 111                 |
| 0                    | 134,80           | -0,0222                                       | 152                 |
| 0                    | 225,80           | -0,0196                                       | 102                 |
| <b>Média</b>         |                  | -0,0234                                       | 122                 |
| <b>Desvio padrão</b> |                  | 0,0045                                        | 27                  |

A média dos valores obtidos nos fornece a função de transferência do sistema, de acordo com a Equação 2.

$$G(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} = -\frac{0,0234}{122 s + 1} \quad (2)$$

### 3.4 VALIDAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Para validar o modelo foi realizado o teste com aplicação de uma entrada em degrau na vazão da água de resfriamento no valor de 199,4 mL/s. A Figura 9 ilustra o gráfico da simulação realizada utilizando os valores da função de transferência calculada para prever o comportamento do sistema para esse degrau. Na mesma figura foi plotada a curva referente ao experimento realizado com a aplicação da referida entrada em degrau no módulo experimental.



**Figura 9** - Validação da função de transferência.

Através dessa última curva obtida experimentalmente foram calculadas as constantes mostradas na Tabela 2.

**Tabela 2** - Valores das constantes da validação do sistema para o registro 1 fechado.

| Abertura V1<br>[mL/s] | Degrau V2<br>[mL/s] | $K_p$<br>[°C s/mL] | $\tau_p$<br>[s] |
|-----------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 0                     | 199,40              | -0,0220            | 143             |

Os valores das constantes  $K_p$  e  $\tau_p$  diferem em, respectivamente, -5,85% e 17,5% dos valores calculados anteriormente para a função de transferência. A diferença observada é atribuída ao fato do sistema compreender muitos distúrbios que contribuem para variação desses parâmetros. Esses distúrbios incluem, como exemplo, a não constância da alimentação de calor, as flutuações na vazão de água de resfriamento, além das perdas de calor na coluna.

### 3.5 DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA COM O REGISTRO 1 PARCIALMENTE ABERTO

Visando estudar a influência da vazão de água de resfriamento do registro 1 na temperatura do vapor de produto, também foram aplicados degraus na condição em que o registro 1 estava com vazão igual a 70 mL/s. Esse registro possui comportamento similar ao registro 2, sendo, portanto, não linear.

Na Tabela 3 são mostrados os valores calculados para as constantes da função de transferência do registro 2 com o registro 1 parcialmente aberto.

**Tabela 3** - Valores para as constantes da função de transferência com o registro 1 parcialmente aberto.

| Abertura V1<br>[mL/s] | Degrau V2<br>[mL/s] | $K_p$<br>[°C s/mL] | $\tau_p$<br>[s] |
|-----------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| 70                    | 33,13               | -0,0532            | 352             |
| 70                    | 68,56               | -0,0546            | 278             |
| <b>Média</b>          |                     | -0,0541            | 315             |
| <b>Desvio padrão</b>  |                     | 0,0013             | 52              |

Observa-se uma clara diferença entre os valores das constantes obtidos com o registro 1 fechado e os obtidos com o mesmo parcialmente aberto. Esse resultado está relacionado ao fato de que quando o registro 1 está aberto, tem-se uma menor vazão de vapor na entrada do condensador 2. Dessa forma, uma menor vazão de água de resfriamento causa variações na temperatura do vapor no topo similares à situação anteriormente analisada. O maior valor da constante de tempo  $\tau_p$  indica também que, quando o registro 1 está parcialmente aberto, o condensador 2 realiza o resfriamento de forma mais lenta.

Para as condições do experimento, quando foram aplicados valores de vazão de água de resfriamento no registro 2 maiores que 199,4 mL/s, o sistema foi resfriado além do desejável, condensando toda a mistura de vapor e interrompendo a produção de destilado.

### 3.6 INFLUÊNCIA DE DISTÚRBIOS NO PROCESSO

É importante destacar a interferência que alguns distúrbios podem causar no sistema, afetando a precisão e exatidão dos dados obtidos. Pode-se citar como primeiro exemplo, a variação do calor fornecido pela combustão da lenha, que altera a temperatura do sistema e a quantidade da mistura etanol/água que é evaporada e atinge os condensadores. A quantidade de lenha colocada na fornalha é uma variável difícil de ser controlada no sistema utilizado. As características da madeira, como o tamanho, composição e umidade, não são sempre as mesmas. Além disso, a combustão é fortemente afetada pela temperatura e disponibilidade do gás comburente, o oxigênio fornecido pelo ar. O calor cedido é, então, susceptível às variações da temperatura ambiente, força e direção do vento e superfície de contato da lenha.

Outra variável do sistema é a temperatura de entrada da água de resfriamento, que varia com a temperatura ambiente. A vazão de entrada da água nos trocadores de calor nem sempre é constante devido à dependência do sistema de água utilizado com o abastecimento da residência do sítio. Junto a esses fatores, somam-se ainda as perdas de calor da coluna para o ambiente.

## 4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada a modelagem experimental de uma coluna de destilação, usando uma função de transferência de primeira ordem de forma a representar a dinâmica do condensador de refluxo da coluna e se chegou as seguintes conclusões:

- ✓ O ganho e a constante de tempo da função de transferência de primeira ordem do condensador do topo da segunda coluna foram obtidos satisfatoriamente com valores e erros associados iguais a, respectivamente,  $-0,0234 \pm 0,0045$  [°C.s/mL] e  $122 \pm 27$  [s].
- ✓ A função de transferência foi validada com a simulação e execução de uma entrada em degrau com vazão compreendida pelos limites do modelo experimental. Obteve-se boa concordância do experimento com a simulação fornecida pela função de transferência.
- ✓ Os valores obtidos para as constantes da função de transferência quando os registros dos dois condensadores atuavam simultaneamente se diferenciaram das constantes obtidas quando somente o último registro atuava. Essa observação foi atribuída à menor temperatura e vazão de entrada do vapor no trocador de calor.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao professor Juarez de Souza e Silva da UFV pela disponibilização da coluna de destilação para a pesquisa.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, R. R.; ALMEIDA, S. J. N. **Projeto e implementação de um controlador Fuzzy para temperatura de topo de uma coluna de destilação didática**. 2009. 52 f. Monografia (Curso superior em Tecnologia em Automação Industrial) – Instituto Federal de Ciência e Tecnologia, Goytacazes, RJ, 2008.

CARVALHO, A. S.; FELIPE, L. H. G. Modelagem de colunas de destilação através de modelos auto-regressivos. In: Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia (SEGeT), 4., 2007, Resende.

GEHLEN, C. O.; APIO, A.; KOCH, G. G.; FRANCHI, C. M.; HOFFMANN, R.; SALAU, N. P. G. Implementation of an indirect control structure for composition in a hybrid distillation column. **Separation Science and Technology**, Santa Maria, RS, v. 50, n. 16, p. 2532-2544, jun 2015.

KETZER, F. **Modelagem, simulação e controle de uma coluna de destilação descontínua apropriada à produção de etanol em pequena escala**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) -

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

LOPES, M. M.; SONG, W. T. Batch distillation: Better at constant or variable reflux? **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, São Paulo, SP, v. 49, n. 12, p. 1298-1304, dez.2010.

TEXAS INSTRUMENTS, 2017. **LM 35 – Precision centigrade temperature sensors**. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>. Acesso em: Janeiro de 2018.

RIBEIRO, M. A. **Instrumentação**. 8. ed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria Ltda, 1999.

SEBORG, D. E; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process dynamic and control**. 2. ed. Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, 2004.

SILVA, J. S. **Produção de Álcool Combustível na Fazenda e em Sistemas Cooperativos**. Viçosa: [s.n.], 2007.

STOJKOVIC, M.; GERBAUD, V.; SHCHERBAKOVA, N. Batch distillation of binary mixtures: preliminary analysis of optimal control. **IFAC (International Federation of Automatic Control) Papers On Line**, Toulouse, France, v. 50, n. 1, p. 4899-4904, jul.2017.