



XXI Congresso Brasileiro
de Engenharia Química

Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro



XVI Encontro Brasileiro sobre o
Ensino de Engenharia Química
Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro

SISTEMA DE CONTROLE FUZZY DE COLUNAS DE DESTILAÇÃO DE ETANOL

E. P. TEIXEIRA¹ e F. R. ZUFFI²

¹ Universidade de Uberaba, Curso de Engenharia de Computação

² SIC – Sistemas Inteligentes de Controle Ltda

E-mail para contato: edilberto.teixeira@gmail.com

RESUMO – Apresenta-se, neste trabalho, um sistema para controle fuzzy para colunas de destilação e que tem sido utilizado com sucesso em usinas de produção de etanol, com o objetivo de controle da densidade de saída do produto e do controle da vazão de vinho. O sistema é implantado em um computador que troca mensagens com o controlador lógico programável (CLP), via comunicação OPC. O operador do processo tem disponível a opção de escolher o controle convencional, ou o controle fuzzy, diretamente da tela do sistema supervisor de operação do processo. Caso haja algum problema, o controle do processo retorna para o operador, simultaneamente à ocorrência de alarme específico. O controle da vazão de vinho de entrada e da densidade do etanol são implementados por meio de controladores fuzzy que incluem até cinco variáveis de entrada. Cada variável está associada a três funções de pertinência, que contribuem para a atualização da variável de controle. Desta forma, a base de regras gerada contempla todas as possíveis circunstâncias, atuando de forma repetitiva, com o objetivo de redução do erro de controle. Neste trabalho, são apresentados os detalhes desses controladores.

1. INTRODUÇÃO

O problema de controle automático de colunas de destilação tem sido objeto de inúmeras investigações e ainda é objeto de muitas pesquisas. Devido às múltiplas perturbações e às diversas opções de controle, em grande parte dos casos, o controle é realizado de forma manual, isto é, o operador do processo é o responsável por atuar, a todo instante, nas variáveis de controle. O grande desafio para esses operadores é manter as variáveis de processo dentro dos limites especificados além de cuidar para que haja economia de vapor e, também, para que não ocorra inundação, ou a perda de produto final pelo fundo da coluna. Outros detalhes específicos da destilação de etanol são descritos ao longo deste trabalho que trata especificamente de colunas binárias, como é o caso da destilação de etanol, onde se obtêm o produto de topo e o produto de fundo.

Os problemas inerentes ao processo de destilação são comuns às colunas utilizadas em indústrias químicas em geral (Kister, 1992) e, principalmente, para os casos de refinarias de petróleo e usinas de produção de etanol. Sendo assim, descreve-se neste trabalho um sistema de controle

PROMOÇÃO

REALIZAÇÃO

ORGANIZAÇÃO



denominado SIC-FUZZY, desenvolvido pela SIC Engenharia, e que já foi empregado em colunas de destilação de goma chantana e de etanol, além de aplicações em agroindústrias, como secagem de farelo e controle de temperatura e de nível para processamento de soja e de milho. Neste trabalho, concentra-se no controle de densidade em colunas de destilação de etanol. Para tanto, na próxima seção, apresenta-se uma breve descrição desse tipo de processo industrial.

2. BREVE DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO DE ETANOL

Na destilação, que é a última etapa de produção, o etanol é separado dos demais componentes do vinho proveniente da etapa de fermentação. O vinho é composto de líquidos, materiais sólidos e gases. Sendo assim, pode-se agrupar essas substâncias em voláteis e fixas. As substâncias voláteis incluem água, álcool etílico, álcoois superiores etc.

A separação do etanol dessas outras substâncias é realizada por algumas etapas de destilação. Na primeira etapa, ocorre a eliminação de impurezas como aldeídos e ésteres. O vinho depurado que sai desta etapa vai para a coluna de destilação A, de onde se obtém a flegma que contém álcool e água, além da vinhaça que é um resíduo com as substâncias fixas do vinho. Parte das substâncias voláteis também permanecem na vinhaça que é usada como fertilizante nas plantações de cana de açúcar. Parte do calor contido na vinhaça é recuperado, transmitindo-o ao vinho de entrada por um trocador.

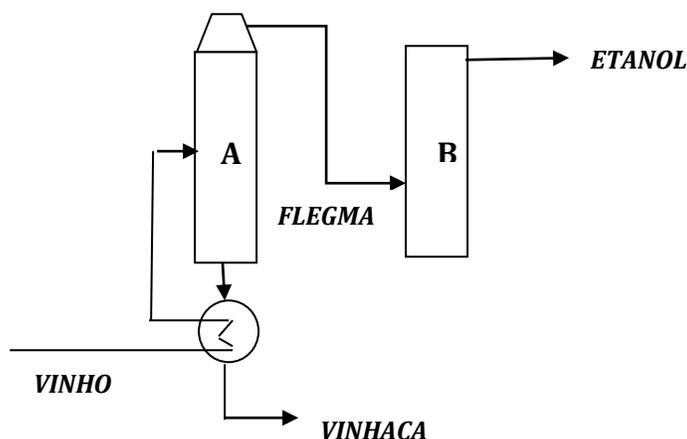


Figura 1 – Colunas de destilação de etanol.

A flegma proveniente da coluna de destilação A é alimentado na coluna de destilação B, onde se processa a etapa de retificação para se obter o álcool hidratado, comumente usado como combustível para os automóveis no Brasil. Para a Agência Nacional do Petróleo (ANP), o limite mínimo de etanol na mistura é de 94,5% em volume. A água pode ser de 4,9%, no máximo. Para se obter o álcool anidro, com porcentagens próximas a 100% de etanol, é necessária uma etapa de desidratação que pode ser realizada com agentes desidratadores, tais como o uso de ciclohexano ou peneira molecular. Neste trabalho, concentra-se no processo de controle das colunas A e B para a



XXI Congresso Brasileiro
de Engenharia Química

Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro



XVI Encontro Brasileiro sobre o
Ensino de Engenharia Química
Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro

produção do álcool hidratado. Na próxima seção, são apresentadas as características de controle desse processo.

3. O PROBLEMA DE CONTROLE DE COLUNAS DE DESTILAÇÃO DE ETANOL

A separação de elementos em uma mistura de fluidos realizada por meio de colunas de destilação apresenta os problemas inerentes aos sistemas multi-variáveis, não-lineares e difíceis de serem descritos por equações diferenciais, devido à grande dificuldade de identificação dessas equações (Roffel e Betlem, 2006). Tais sistemas possuem parâmetros variantes com tempo e podem ser operados por meio de uma grande combinação de estratégias de controle. Neste trabalho, trata-se apenas do controle de colunas binárias, onde há um produto final de topo e, em geral, um produto de fundo que, no caso de destilação de etanol, trata-se de um rejeito.

O elemento de entrada, denominado vinho, é injetado na coluna por meio de uma válvula de controle. A sua vazão é controlada de acordo com a estratégia de controle adotada. Por exemplo, a vazão de vinho da entrada pode ser a variável de processo utilizada para se manter o nível do produto de fundo dentro de um valor especificado. No caso da destilação de etanol, é comum o operador do processo se ver obrigado a aumentar a vazão de vinho além do que seria recomendável para não retardar o processo de colheita da cana de açúcar, nos períodos mais intensos de safra. Em alguns casos, essa forma de operação é economicamente recomendável em detrimento dos critérios de controle. Em grande parte das usinas produtoras de etanol, tanto os controles da vazão de vinho de entrada, como da densidade do etanol na saída, são realizados de forma manual, ou seja, cabe ao operador do processo atuar a todo instante, tanto nas válvulas de entrada de vinho, como naquelas de admissão de vapor e de retirada de etanol. Isto é feito com base em sua experiência de operação e procurando manter a densidade do etanol dentro dos parâmetros especificados. Cabe também a ele cuidar para que não haja perda de flegmassa pela coluna, além de verificar se as pressões e as temperaturas das colunas estão, o mais próximo possível, dentro da faixa desejável de operação. Trata-se de uma tarefa exaustiva e que exige muita atenção do operador devido às perturbações nas diversas variáveis que afetam a operação do processo. Algumas dessas perturbações são mensuráveis com transmissores devidamente instalados. Dentre essas perturbações, citam-se as variações na pressão de vapor proveniente das caldeiras. Como esse vapor é utilizado em outras áreas da usina, variações de pressão e de temperatura são comuns. Como isso, a entalpia do vapor injetado na coluna, muitas vezes, não é suficiente para o trabalho de destilação, considerando-se a oferta de vinho, naquele momento. Nesses casos, torna-se necessário reduzir a vazão de vinho na entrada, para que a densidade final do etanol não fique comprometida. Um exemplo de perturbação não mensurada é a composição de etanol no vinho. Isto porque, em muitos casos, essa grandeza não é medida. Outras perturbações são inerentes ao próprio processo, visto que se trata de um sistema com intenso acoplamento entre as variáveis. Por exemplo, a atuação na válvula de vazão de vinho afeta o nível de fundo, a pressão e a temperatura da coluna, além da densidade de saída do etanol.

Considerando-se todas essas características, a opção de controle mais atraente é o uso de controladores *fuzzy*, que é a escolha deste trabalho, devido ao fato da não exigência de estimação das equações dinâmicas do processo. Além do mais, a lógica *fuzzy* permite a incorporação da experiência

PROMOÇÃO

REALIZAÇÃO

ORGANIZAÇÃO





XXI Congresso Brasileiro
de Engenharia Química

Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro



XVI Encontro Brasileiro sobre o
Ensino de Engenharia Química
Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro

de operação na base de regras do controlador, adaptando-a a cada caso específico. A sessão seguinte apresenta as características dos controladores propostos neste trabalho.

4. CONTROLADORES FUZZY APLICADOS AO CONTROLE DE COLUNAS DE DESTILAÇÃO DE ETANOL

Com base na descrição acima, optou-se por três controladores *fuzzy*, com o desafio de manter a operação das colunas de destilação de etanol no modo automático, e com a atuação mínima dos operadores do processo. O primeiro controlador determina a vazão de vinho na entrada da coluna A. O segundo atua na vazão de vapor injetado na coluna A, de forma a manter a temperatura de topo dentro da faixa especificada de operação. O terceiro controlador tem como objetivo manter a densidade do etanol de saída o mais próximo possível do valor de *setpoint*. Para tanto, atua-se na vazão de etanol na saída do processo.

As variáveis de entrada utilizadas no primeiro controlador são o nível do fundo da coluna, a temperatura do topo da coluna, a entalpia do vapor, a vazão e a densidade de saída de etanol. Em alguns casos, não havendo transmissor de vazão, utiliza-se a própria medida de abertura da válvula de controle. O controlador *fuzzy* estima qual seria a vazão ideal no sentido de se salvaguardar as condições ideais de operação da coluna. Um segundo controlador atua na válvula de entrada de vapor, de forma a manter a temperatura do topo da coluna com a menor variabilidade possível. Neste caso, a base de regras do controlador utiliza a temperatura do topo da coluna e a entalpia do vapor como variáveis de entrada. O terceiro controlador tem por finalidade manter a densidade de saída do etanol dentro de uma faixa estreita, próxima ao *setpoint*. Entretanto, por se tratar de um controlador inteligente, esse não é o único requisito que se leva em conta ao se atuar na variável de controle que, neste caso, é a própria vazão de saída de etanol. A temperatura do topo da coluna, a entalpia do vapor, a vazão de saída de etanol e a densidade de saída de etanol são as variáveis de entrada desse controlador.

Utilizam-se controladores *fuzzy* tradicionais com funções de pertinência e bases de regras ajustadas segundo os critérios de operação dessas colunas. Um extenso trabalho de ajuste torna-se necessário devido às múltiplas regras provenientes das diversas combinações de variáveis de entrada e suas funções de pertinência. Os controladores *fuzzy* atuam de forma a evitar que variações nas grandezas de entrada venham a provocar offset, ou transitórios indesejáveis na variável de processo. Sendo assim, o caráter preditivo é fundamental para que se atue de forma antecipada. Por esse motivo, o uso da derivada das variáveis de entrada torna-se fundamental (Teixeira, 1995). Para se evitar exageros no uso da função derivada, filtros adequados são aplicados a essas variáveis. Há que se considerar também os atrasos aliados a cada uma dessas variáveis, visto que a localização dos transmissores pode influenciar sobremaneira a ação de cada variável, na malha de controle em questão.

Na composição dos controladores *fuzzy*, foram empregados, na maioria dos casos, três funções de pertinência triangulares para cada variável. Desta forma, o número de regras para controlador é igual 3^n , onde n é o número de variáveis. Para se considerar a influência específica de cada regra na variável de controle, os operadores *raiz quadrada* e *quadrado* são utilizados para as operações *pouco*

PROMOÇÃO

REALIZAÇÃO

ORGANIZAÇÃO



e *muito*, respectivamente. Na fase de fuzificação, as funções de pertinência são aplicadas às variáveis envolvidas em cada malha de controle. Para tanto, definiu-se o universo de discurso para cada variável com base nas suas faixas de operação e não simplesmente no range dos *tags* envolvidos. Isto deve-se ao fato de que, muitas vezes, o range de cada instrumento estabelece uma faixa muito grande que não condiz com as condições de operação da variável em questão. A adoção direta do range, como universo de discurso, poderia tornar desprezível variações importantes em tais variáveis.

A máquina de inferência, criada com essas variáveis, gera uma função de pertinência para a variável de controle, cujo universo de discurso também é adotado levando-se em consideração a faixa real de operação do processo que, no caso específico da densidade de saída do etanol, trata-se da abertura da válvula de saída que varia de zero a 100%. Na defuzificação, utiliza-se a média ponderada para o cálculo final do incremento a ser dado à variável de controle.

5. IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA SIC-FUZZY

O sistema é normalmente implantado em um computador que troca mensagens com o controlador lógico programável do processo, via comunicação OPC (fig. 2). O operador tem disponível a opção de escolher o controle convencional, ou o controle *fuzzy*, diretamente da tela do sistema supervisor de operação do processo. Caso haja algum problema na comunicação OPC, o controle do processo retorna para o operador, simultaneamente à ocorrência de alarme específico. Estão também programadas outras ocorrências que, da mesma forma, transferem o comando para o operador, no sentido de garantir segurança total na operação da coluna.

IMPLANTAÇÃO DO CONTROLADOR SIC-FUZZY

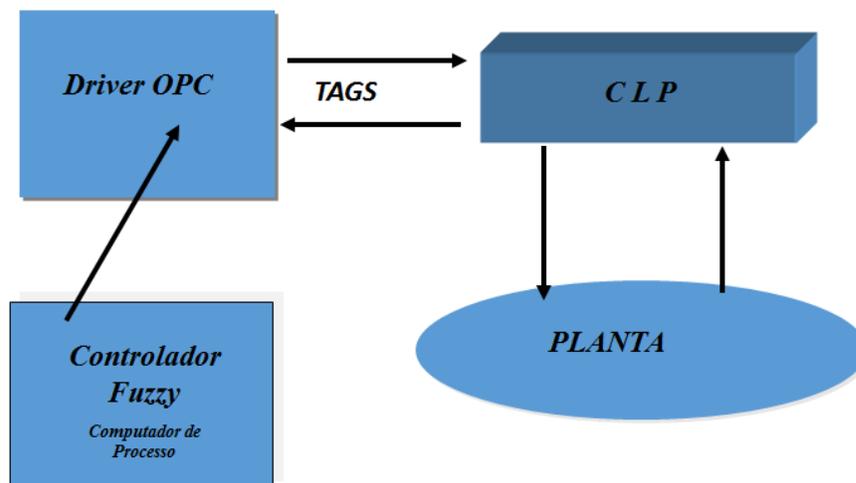


Figura 2 – Troca de informações entre o controlador *fuzzy* e o processo.

Esta estratégia de automação dá ao operador a segurança de poder atuar nos casos críticos, visto que o comando da operação volta a ele com apenas um clique. Deve-se também salientar que a sua presença constante na sala de operação é imprescindível em processos dessa complexidade, mesmo com a implantação do controlador SIC-*FUZZY*. A figura 3 apresenta um gráfico de tendência durante a operação do sistema de destilação em uma usina de produção de etanol. Pode-se observar a baixa variabilidade da densidade do etanol, mesmo considerando-se as variações das demais grandezas. Apenas as entradas com maior variabilidade foram incluídas no gráfico, para se facilitar a sua visualização.

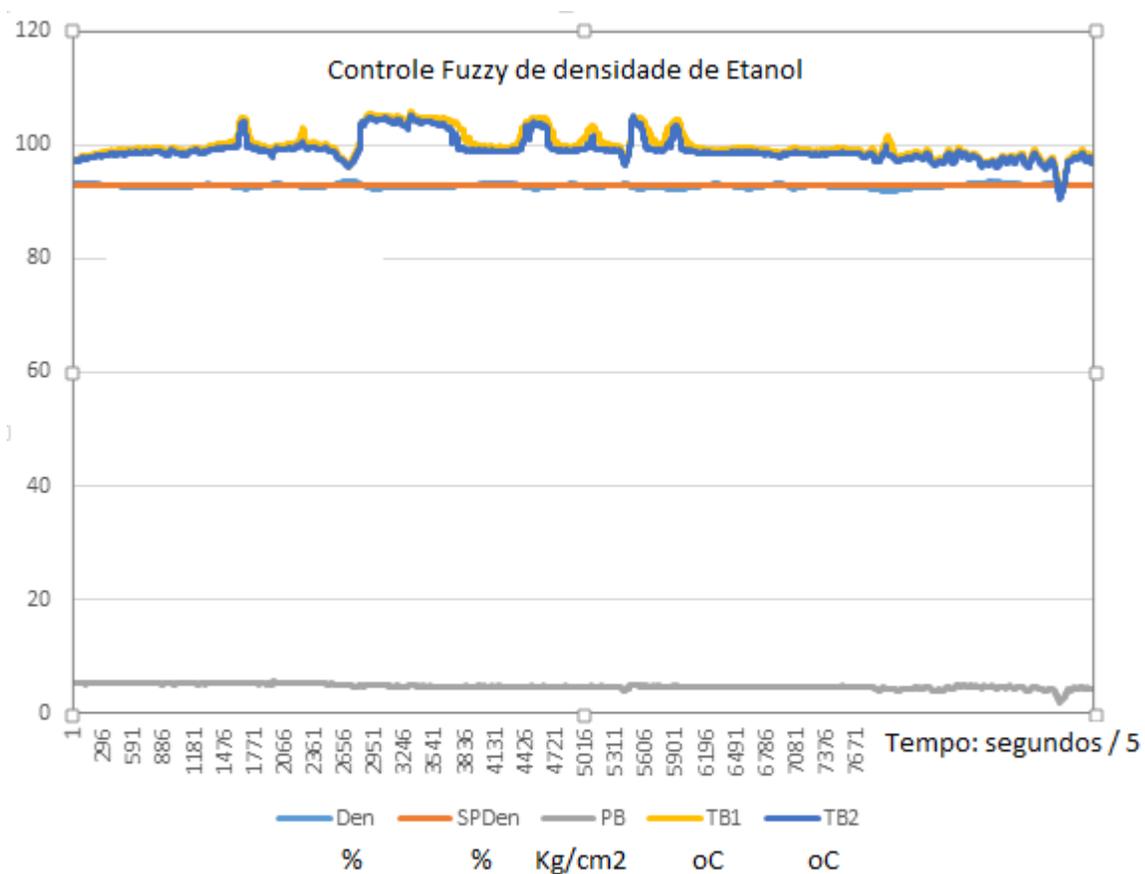


Figura 3 – Gráfico de tendência do controle *fuzzy* de densidade de etanol.

Na figura 3, foram incluídos os valores da densidade de saída do etanol (Den %), o seu valor de *setpoint* (SPDen %), a pressão na coluna B (PB, kgf/cm²) e as temperaturas TB1 e TB2 em duas bandejas da coluna B, em °C. Como se pode observar, apesar da variabilidade das demais grandezas, observa-se que a densidade do álcool, manteve-se bastante próxima ao valor de *setpoint*. A média do erro da densidade em relação ao *setpoint*, em aproximadamente 2 horas, foi de 0,00655%, com desvio padrão equivalente a 0,0756%. É importante considerar que nesse intervalo, não houve ação do



XXI Congresso Brasileiro
de Engenharia Química

Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro



XVI Encontro Brasileiro sobre o
Ensino de Engenharia Química
Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro

operador do processo, motivo pelo qual o *setpoint* de densidade do etanol manteve-se inalterado em 93,1 %.

6. CONCLUSÕES

O controlador descrito neste trabalho tem sido empregado com sucesso em usinas para produção de etanol com o objetivo principal de manter a densidade de saída, com baixa variabilidade em torno do *setpoint*. Como consequência adicional, tem-se observado que, devido à operação em um regime de baixa variabilidade, ocorre uma sensível economia de vapor, além de se minimizar a perda de flegmassa pela coluna. Portanto, o retorno de investimento que se espera com a implantação do controlador SIC-*FUZZY* não provém da dispensa dos operadores e sim na melhoria do produto final, na economia de energia e de matéria prima, além da redução do número de paradas de operação por erros de controle.

Pode-se também concluir sobre a conveniência do uso de controladores *fuzzy* para este tipo de processo, devido ao fato de se poder incorporar a experiência de operação na base de regras do controlador. O controlador *fuzzy* passa a cuidar de forma simultânea de todas as condições de operação e atuando de forma repetitiva a cada instante de amostragem. No caso das colunas de destilação de etanol, onde se aplicou o controlador SIC-*FUZZY*, utilizou-se o intervalo de amostragem de 5 segundos. Sendo assim, como o controlador opera ininterruptamente, não há necessidade de se atuar de forma brusca, como fazem os operadores nos casos críticos. Desta forma, a atuação do controlador *fuzzy* é bastante suave e preditiva.

6. REFERÊNCIAS

KISTER, H. Z.; Distillation Design, McGraw-Hill, Inc, New York, 1992

ROFFEL, B.; BETLEM, B. Process Dynamics and Control, Editora John Wiley & Sons, Ltd, London, 2006.

TEIXEIRA, E. P.; Influence of the Data Base Internal Parameters in the Performance of *Fuzzy* Controllers, Sixth International *Fuzzy* Systems Association World Congress, 1995. p.261 - 265.

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG pelo suporte dado à apresentação deste trabalho no COBEQ 2016.

PROMOÇÃO



REALIZAÇÃO



ORGANIZAÇÃO

