

ESTUDO DE EFEITOS TÉRMICOS DE MISTURAS HIDROALCOÓLICAS EM PROCESSOS DE DESTILAÇÃO

Fabiana Moreira de Assis Costa¹, Guilherme Abreu Cruz², José Izaquiel Santos da Silva³

^{1,2}Graduandos em Ciência e Tecnologia da Univ. Fed. dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina – MG, Brasil

³Prof. da Univ. Fed. dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina – MG, Brasil.
E-mail para contato: izaquiel@ict.ufvjm.edu.br

Recebido em: 31/03/2015 – Aprovado em: 15/05/2015 – Publicado em: 01/06/2015

RESUMO

A crescente demanda por combustível tem aumentado os estudos com relação à produção de biocombustíveis, principalmente, o advindo da cana-de-açúcar, que é abundante no Brasil, tornando-se cada vez mais vantajoso investir em tecnologias. O vinho é uma carga composta por água, álcool isoamílico, etanol e outros componentes em menores concentrações, o qual transita por uma operação unitária denominada destilação, com a finalidade de obter a maior porcentagem do álcool isoamílico e também do etanol, muito utilizados nas especialidades farmacêuticas e químicas. Os efeitos das misturas binárias dos componentes são estudados e analisados de forma criteriosa para obter o melhor desempenho possível, no intuito de otimizar sua produção na indústria. O pacote computacional EMSO (*Environment for Modeling, Simulation and Optimization*) apresentou um papel fundamental neste estudo para prever os resultados mais próximos do real. No decorrer do processo foram realizadas análises de misturas hidroalcoólicas, considerando o tempo, pressão e vazão já pré-estabelecidos. O equilíbrio líquido-vapor (ELV) foi satisfatoriamente verificado, com atenção especial na mistura água-álcool isoamílico, visto que, em uma dada fração molar dos componentes desta mistura binária, a água e o álcool isoamílico tenderem a formarem duas fases líquidas, expondo uma inconsistência no ELV, que após um tempo é restabelecido, o que ocasiona um aumento da fração molar de vapor da água. Os resultados obtidos apresentaram perfis semelhantes aos observados na literatura, validando, de forma qualitativa, a metodologia abordada neste trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Efeitos das mistura, equilíbrio líquido-vapor, EMSO, vinho.

STUDY OF THERMAL MIXTURES HYDROALCOHOLIC EFFECTS IN DISTILLATION PROCESS

ABSTRACT

The growing demand for fuel has increased the studies in the production of biofuels, especially that coming from sugar cane, which is abundant in Brazil, becoming increasingly advantageous to invest in technologies. Wine is a charge composed of water, isoamyl alcohol, ethanol and other components in lower concentrations, which moves by an operation called distillation unit, in order to obtain the highest percentage of isoamyl alcohol and ethanol, commonly used in pharmaceutical and

chemical specialties. The effects of binary mixtures of components, are studied and analyzed wisely to get the best result possible in order to optimize its production in the industry. The computer package EMSO (Environment for Modeling, Simulation and Optimization) presented a key role in this study to predict the results closer to the real. In the process were carried out analyzes of alcoholic mixtures, considering the time, pressure and flow already pre-established. The vapor-liquid equilibrium (VLE) was found satisfactory, with particular attention to the isoamyl alcohol-water mixture, since for a given mole fraction of the components of this binary mixture, water and isoamyl alcohol tended to form two liquid phases, giving an inconsistency in the VLE, which is restored after a time, which causes an increase in the mole fraction of water vapor. The results showed similar profiles to those observed in the literature, validating, qualitatively, the methodology discussed in this work.

KEYWORDS: Effects of mixture, vapor-liquid equilibrium, wine, EMSO.

INTRODUÇÃO

Os biocombustíveis têm grande importância, ocasionada por sua capacidade de ser economicamente viável e sustentável. Uma de suas vertentes é o bioetanol, que é produzido principalmente pela fermentação do caldo da cana-de-açúcar, que apresenta um bom custo-benefício, tanto em relação à redução de emissão dos gases de efeito estufa quanto ao seu custo de produção e sua produtividade, mas podendo também ser produzido com o uso da beterraba, soja, mandioca e outros. (BNDES, 2008; SILVA, 2012).

Os produtos da cana-de-açúcar no Brasil são considerados artigos de comércio na economia mundial, sendo um dos mais competitivos internacionalmente. O Brasil produz mais de 600 milhões de toneladas, que coloca o país em primeiro lugar em produção mundial de cana-de-açúcar, desbancando países como a Índia, China e Tailândia (SCHMIDT JUNIOR, 2011; UNICA, 2014).

A partir de qualquer tipo de biomassa, como por exemplo a cana de açúcar, pode-se produzir o bioetanol, que passará por processos como extração ou difusão, obtendo assim uma solução açucarada fermentável que passará por uma segunda etapa, caracterizada por fermentação, que produzirá assim o que se é desejado, o vinho. Este produto é composto por 7 °GL a 10 °GL (porcentagem em volume) de etanol e 89 a 93% de água em volume, além de outros produtos (SILVA, 2012).

Após a formação do vinho, uma mistura multicomponentes que foi levedurada durante o processo de fermentação, fica retido em um tanque chamado dorna volante, que será bombeado para a coluna de destilação onde ocorrerá a separação dos componentes por diferença de ponto de ebulição, como visto na Figura 1. É nesta etapa que ocorre a recuperação do etanol, álcool isoamílico e de outros componentes em menores quantidades (FRITZEN et al., 2012).



FIGURA 1: Esquema do processo de fermentação do vinho.
 Fonte – Adaptado de FRITZEN et al., (2012); SILVA, (2012).

Segundo FERREIRA (2012), o álcool isoamílico possui importância socioeconômica, e, devido ao valor comercial, a sua obtenção é desejada. No processo de fracionamento, obtém-se o álcool isoamílico, o qual é o constituinte principal do óleo fúsel (composto por álcoois de cadeia longa, como o álcool isoamílico, álcool isobutílico e outros), que apresenta valor econômico, devido a sua utilização em ésteres de aroma e de lubrificantes, além da utilização como matéria prima na indústria química e farmacêutica.

Para que o processo de destilação do bioetanol e recuperação do álcool isoamílico seja eficaz, os efeitos de misturas entre estes componentes precisam ser bem entendidos. Assim o equilíbrio de fases, que é situação real de muitos processos industriais, é caracterizado em termos de equilíbrio líquido-vapor, porém também pode-se encontrar equilíbrio vapor/sólido, líquido/sólido e líquido-líquido. Podem-se calcular temperaturas, pressões e composições das fases em um sistema de equilíbrio de, pelo menos, duas maneiras. Sendo a primeira pela lei de Raoult e a outra pela lei de Henry (SILVA, 2012).

A lei de Raoult é validada para certas condições do sistema, válida para situações de moderadas a baixas pressões, e geralmente utilizadas para compostos similares quimicamente. Ela tem como utilidade, o cálculo de ponto de bolha e de orvalho de misturas que se encontram em equilíbrio líquido-vapor (ELV). Entretanto, o cálculo destes pontos demanda atenção nas particularidades físico-químicas da mistura e na abordagem matemática e termodinâmica, o que implica no surgimento de dificuldades neste tipo de operação. Contudo, há duas hipóteses para a simplificação dos cálculos: consideração do vapor como um gás ideal, e o líquido como uma solução ideal (VAN NESS et al., 2007).

A expressão quantitativa da lei de Raoult pode ser vista na equação 1:

$$y_i P = x_i P_i^{sat} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

Sendo, y_i , fração molar da espécie i na fase vapor; P , pressão total do sistema; x_i , fração molar da espécie i na fase líquida; P_i^{sat} , pressão de saturação do componente i .

O cálculo do ELV também pode ser efetuado com a utilização da lei de Henry, contudo, neste caso, as espécies envolvidas devem estar em concentrações muito baixas e também sendo limitadas às pressões baixas a moderadas (e devem estar na condição de diluição infinita). A característica particular da lei de Henry é que ela

consegue retratar os cálculos em condições operacionais acima das condições críticas. A formulação simplificada da lei de Henry pode ser visualizada na equação 2 (VAN NESS et al., 2007) que pode ser calculada como:

$$y_i P = x_i H_{i1} \quad (2)$$

Em que y_i , fração molar na fase vapor; P , pressão total do sistema; x_i , fração molar da espécie i na fase líquida; H_{i1} , constante de Henry da espécie i .

O vinho de levedurado, o qual é submetido ao processo de destilação e recuperação dos produtos desejados, é uma mistura multicomponentes, que pode apresentar o furfural, glicerol, outros álcoois superiores, dentre outros componentes. Contudo, alguns sistemas binários podem ser levados em consideração como hipóteses simplificadoras para cálculos dos efeitos de mistura.

Assim, pode-se citar o sistema etanol/água cuja característica é de uma mistura não ideal, que forma um azeótropo, indicando que, em determinada faixa de destilação, não mais se conseguirá separá-los por destilação convencional. (FERREIRA, 2012). Segundo este mesmo autor e SILVA (2012), o outro sistema é o água/álcool isoamílico(3-metil-1-butanol), que são poucos miscíveis à temperatura ambiente, ou seja, formam-se duas fases líquidas. É caracterizado por formar uma mistura azeotrópica heterogênea. Desta forma, apresenta uma fase no vapor e duas fases no estado líquido.

O terceiro sistema é o álcool isoamílico/etanol, que por apresentarem natureza similar, a tendência é que o ELV apresente um bom comportamento. Existem limitações na separação por destilação desses componentes, de forma que as misturas azeotrópicas heterogêneas tendem a ser mais facilmente separáveis do que as azeotrópicas homogêneas, devido ao fato do equilíbrio líquido-líquido que ocorre na dorna volante facilitar a separação sem a utilização de outro componente, ou seja a dorna volante funciona como um decantador. Outro fator é a alta demanda energética que é necessária para obter essa separação (LEI et al., 2005; FERREIRA, 2012).

Nos processos industriais, recorre-se constantemente às ferramentas computacionais para a resolução da modelagem matemática da operação. Neste sentido, uma plataforma para simulações e análises de modelagem e simulações de processos é o simulador EMSO, *Environment for Modeling, Simulation and Optimization*, que é um simulador de processos de caráter acadêmico-industrial (com acesso livre e gratuito para fins acadêmicos), sendo usado principalmente pela fácil compreensão da complexidade na construção e análises dos modelos de processos. Nesta ferramenta, pode-se fazer uso da análise de consistência de unidade de medida, verificação de singularidade do sistema, como também a consistência das condições iniciais, além de poder usar simulações em modo dinâmico e estacionário. Sendo usado na linguagem C++, com a vantagem de estar disponível no Windows, Linux e entre outros (VRTECH, 2005; SECCHI & SOARES, 2003; SILVA, 2012).

Este trabalho teve como objetivo estudar os efeitos de mistura entre a água, o álcool isoamílico e o etanol, relacionando uma abordagem termodinâmica. Além de analisar a melhor forma de obter o etanol e o álcool isoamílico com maior grau de pureza, utilizando o simulador de processos EMSO como plataforma de análises.

MATERIAL E METODOS

O estudo foi realizado no Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Campus JK, escolhendo-se um sistema de mistura trifásica, para conhecer seus efeitos térmicos da separação de cada um dos componentes já supracitados, e abordando as características do equilíbrio líquido-vapor.

Um vaso *flash*, equipamento muito utilizado em níveis industriais para vaporizar rapidamente o conteúdo que irá ser destilado, neste caso, é o vinho da cana de açúcar. Primeiramente, o vinho é bombeado da dorna volante, atravessando um trocador de calor, onde receberá energia térmica para atingir a temperatura adequada da carga a ser destilada. O *flash* atuará como um pré-destilador, gerando uma rápida separação entre duas fases saturadas (líquido e vapor). Então, a separação de maneira efetiva ocorrerá nas colunas de destilação que, geralmente, são alocadas logo após os vasos *flashes*. Assim, os vasos *flashes* apresentam importância primordial, sendo utilizados para tratamentos preliminares, pois as temperaturas das misturas são muito próximas. Por fim, estes equipamentos melhoraram significativamente a separação dos componentes da mistura (BRITO, 2010).

Para realizar os cálculos matemáticos, foi utilizada a lei de Raoult modificada para estimar os valores das frações molares e as pressões adequadas para obter o melhor resultado possível. Esta lei despreza a hipótese do líquido ser uma solução ideal, levando em conta os desvios da idealidade das soluções na fase líquida. O coeficiente de atividade, representado por γ_i está relacionada com a temperatura e a composição da fase líquida, conforme a equação 3 (VAN NESS et al., 2007).

$$y_i P = x_i \gamma_i P_i^{sat} \quad (3)$$

Tendo como base a abordagem conhecida como $\phi\phi$ (*phi-phi*), que vem da igualdade entre as fugacidades. A vantagem desse método é a utilização de uma grande faixa pressões e temperaturas, inclusive em situações críticas (ITO, 2002).

$$\bar{\phi}_i^v y_i = \bar{\phi}_i^l x_i \quad (4)$$

Sendo $\bar{\phi}_i^v$, coeficiente de fugacidade da espécie *i* na fase vapor; y_i , fração molar da espécie *i* na fase vapor; $\bar{\phi}_i^l$, coeficiente de fugacidade da espécie *i* na fase líquida; x_i , fração molar da espécie *i* na fase líquida.

Toda a modelagem do processo foi implementada no EMSO, no qual foram realizadas todas as simulações. Os cálculos das propriedades e parâmetros termodinâmicos do modelo foram obtidos com a utilização do VRTherm (software para o cálculo de propriedades de misturas e de substâncias puras), que é um plugin externo solicitado pelo EMSO. Os coeficientes de fugacidade de cada componente da fase vapor foram calculados utilizando as correlações de SRK (SOAVE-REDLICH-KWONG). No caso para fase líquida, utilizou-se o modelo UNIFAC modificado (UNIFAC-DORTMUND). Os parâmetros fixados para a operação do sistema estão no quadro 1.

QUADRO 1: Valores dos parâmetros de operação utilizados nas simulações no EMSO.

Parâmetros:	Valores:
Vazão	100 kmol/h
Pressão sistema água-etanol	1,5 atm
Pressão sistema etanol-álcool isoamílico	2,0 atm
Pressão sistema água-álcool isoamílico	1,0 atm

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo, com ênfase nas simulações no EMSO sobre as misturas binárias entre *água-etanol*, *água-álcool isoamílico* e *etanol-álcool isoamílico*, possibilitou verificar possibilidades para otimizar o processo de destilação, fixando condições pré-estabelecidas como a vazão da carga e a pressão de operação. Desta forma, foram analisadas as composições das frações molares dos produtos em relação à fase vapor e à fase líquida. Com isto, o equilíbrio líquido-vapor (ELV) foi satisfatoriamente verificado, considerando as interações binárias em cada mistura.

Simulações das características do ELV em cada mistura foram realizadas com a finalidade de quantificar e comparar o comportamento em relação à variação de temperatura e frações das espécies em cada fase. Durante os processos de destilação, compreende-se que, em cada ciclo, os valores das variáveis vão se modificando pelo fato de variar as concentrações dos componentes do vinho. Segundo SILVA (2012), conclui-se que o vinho adquirido na entrada do sistema influencia potencialmente no tipo de produto formado. Exemplificando, uma carga com um teor maior de etanol, possibilitará obter especificações de frações maiores destes componentes no produto. Contudo, análises de sensibilidades paramétricas do processo são necessárias e favoráveis para se ter uma melhor caracterização dos efeitos das associações destas misturas em um processo de destilação de misturas hidroalcoólicas.

Sistema Água-etanol

Neste sistema, fez-se uma análise comparativa entre as frações molares da fase gasosa e da fase líquida. O aumento significativo na fração de etanol, na fase vapor, com a evolução do processo demonstrou ser satisfatório, pois diminuirá a fração molar deste álcool no líquido resultante, que poderá retornar ao processo. Este reaquecimento favorecerá a separação dos componentes, fornecendo o etanol mais puro na fase vapor (ver Figura 2).

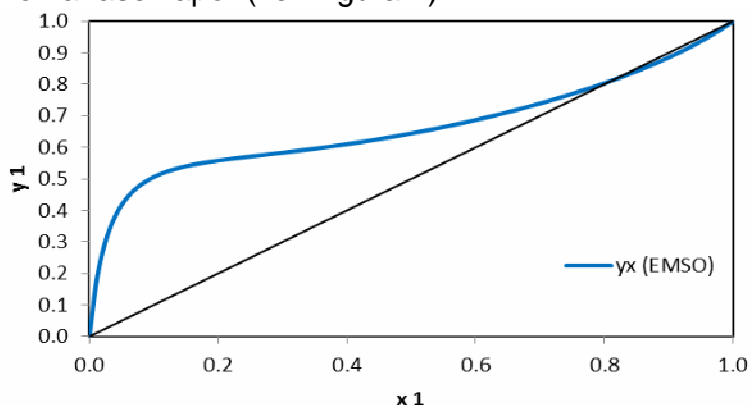


FIGURA 2: ELV da mistura etanol(1)-água(2) a 1,5 atm: previsões no EMSO (UNIFAC-Dortmund/SRK).

Na Figura 3, é visualizado o comportamento da temperatura inicial antes da entrada da carga (385 K). Logo após a entrada da mesma, há uma redução da temperatura, devido à transferência de calor para o vinho. Quando a fração molar do etanol na fase líquida atinge valores em torno de 0,5, as oscilações de temperatura podem ser desprezadas, visto que o estado estacionário foi estabelecido, em aproximadamente 360 K. O comportamento observado na Figura 3 está relacionado com o ELV da mistura etanol-água (Figura 2), pois estes se relacionam para futuros cálculos de projetos e de processos de destilação, tais como, a eficiência global do sistema, eficiência de pratos da coluna de destilação (eficiência de Murphree), entre outros.

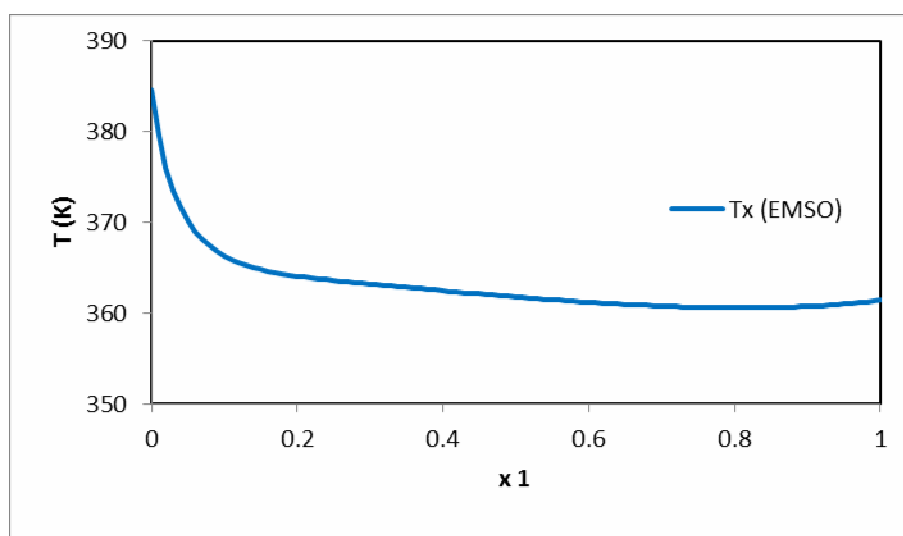


FIGURA 3: Variação da temperatura com a fração molar do etanol (x_1) a 1,5 atm, obtido nas simulações do EMSO.

Sistema etanol-álcool isoamílico

Na mistura binária *etanol-álcool isoamílico* há um crescimento da fração molar do etanol na fase vapor, e, conseqüentemente, o decréscimo na fração molar na fase vapor do álcool isoamílico. Este comportamento observado é esperado, visto que o etanol é mais volátil, representado na Figura 4.

Percebe-se, na Figura 5, que a presença do álcool isoamílico tem pouca interferência em relação à temperatura da mistura, devido a algumas das suas propriedades serem semelhantes as do etanol, e, desta forma, a temperatura permanece, em termos significativos, constante durante todo o processo.

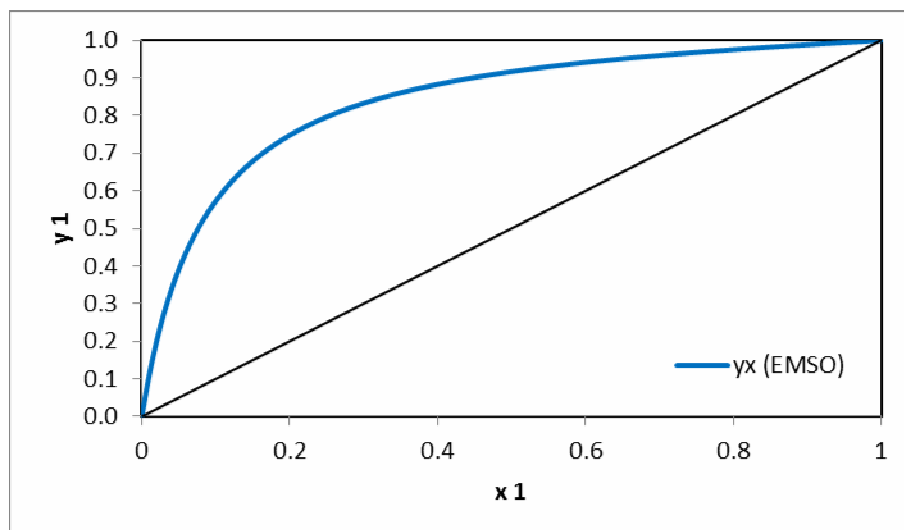


FIGURA 4: ELV da mistura etanol(1)-álcool isoamílico(2) a 2 atm: previsões no EMSO (UNIFAC-Dortmund/SRK)

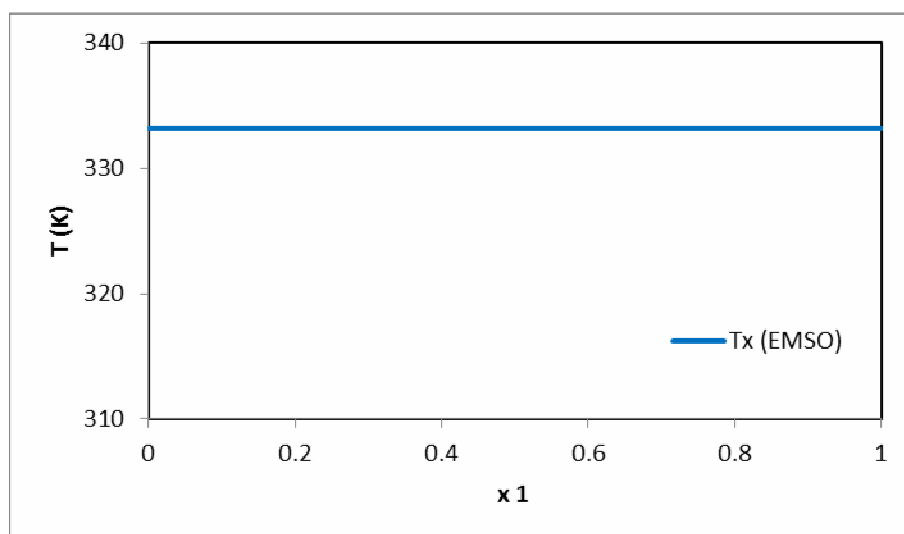


FIGURA 5: Variação da temperatura com a fração molar do etanol (x_1) a 2 atm, obtido nas simulações do EMSO.

Sistema água-álcool isoamílico

Os resultados obtidos para o sistema *água-álcool isoamílico* podem ser visualizados nas Figuras 6 e 7. Percebe-se, na Figura 6, que a água, por ser o componente mais leve nesta mistura, apresenta fração molar na fase vapor crescente até um valor de, aproximadamente, 0,8 (y_1). Conforme SILVA (2012), logo após a fração de $y_1=0,8$ há o surgimento de três fases em equilíbrio (equilíbrio líquido-líquido-vapor (ELLV)), representada pela região tracejada. Esta região não apresenta sentido físico para esta abordagem metodológica (lei de Raoult

modificada), pois esta lei não prevê o comportamento deste tipo de equilíbrio. Assim, pelo efeito de mistura, o comportamento inicial do sistema é restabelecido retornando ao ELV.

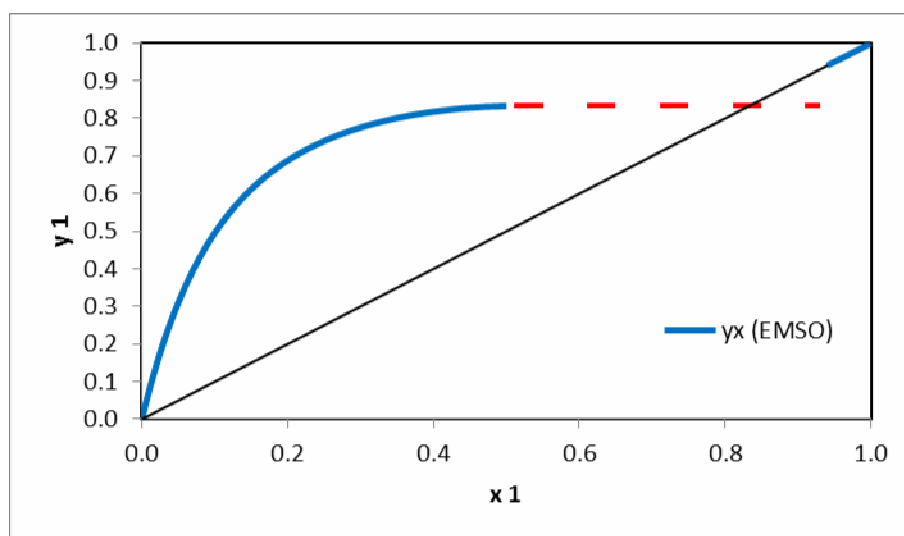


FIGURA 6: ELV da mistura água(1)-álcool isoamílico(2) a 1 atm: previsões no EMSO (UNIFAC-Dortmund/SRK).

Já na Figura 7, apresenta-se também uma inconsistência, representada por símbolos vermelhos (ELLV), os quais indicam uma faixa que não apresenta um significado físico, o que impossibilita a estimativa da temperatura nessa faixa, pelos mesmos motivos destacados no parágrafo anterior. Em virtude da presença do álcool isoamílico na mistura, percebe-se uma interferência associada com aumento da temperatura em relação à outra mistura (*etanol-álcool isoamílico*), de maneira que há, primeiramente, uma baixa de temperatura relacionada com a transferência de calor, e logo após uma subida, devido ao alto valor de calor específico do álcool isoamílico e da sua maior entalpia de vaporização em relação à água, demandando assim, uma carga térmica maior no flash.

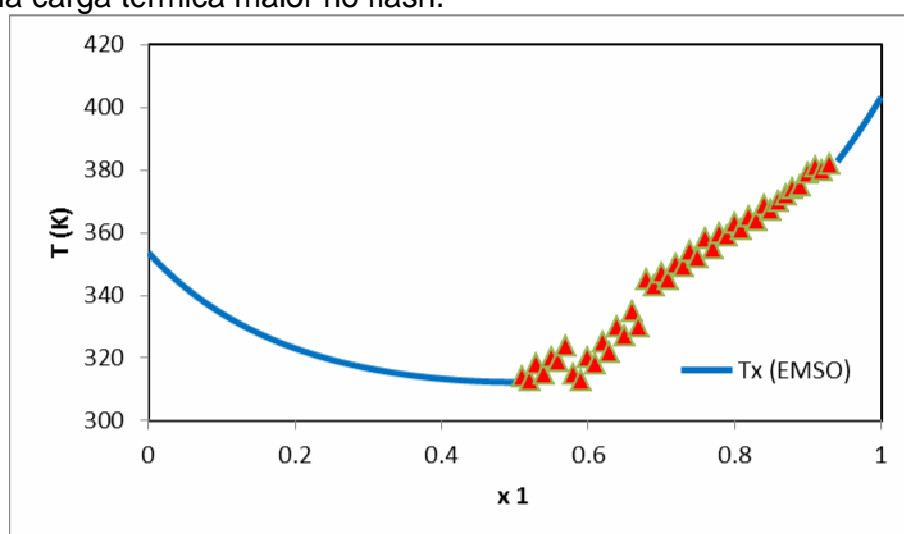


FIGURA 7: Variação da temperatura com a fração molar do etanol a 1 atm, obtido nas simulações do EMSO.

Ao comparar estes resultados (mistura etanol-álcool isoamílico) com os da literatura, é notável uma similaridade entre valores obtidos, podendo ser observada nas Figuras 6 e 8. Contudo, segundo SILVA (2012), houve uma pequena variação entre os dados experimentais e os obtidos com o simulador EMSO, devido às características do modelo UNIFAC do VRTherm, mas sendo plausível o ajuste desses dados na proposta desse trabalho.

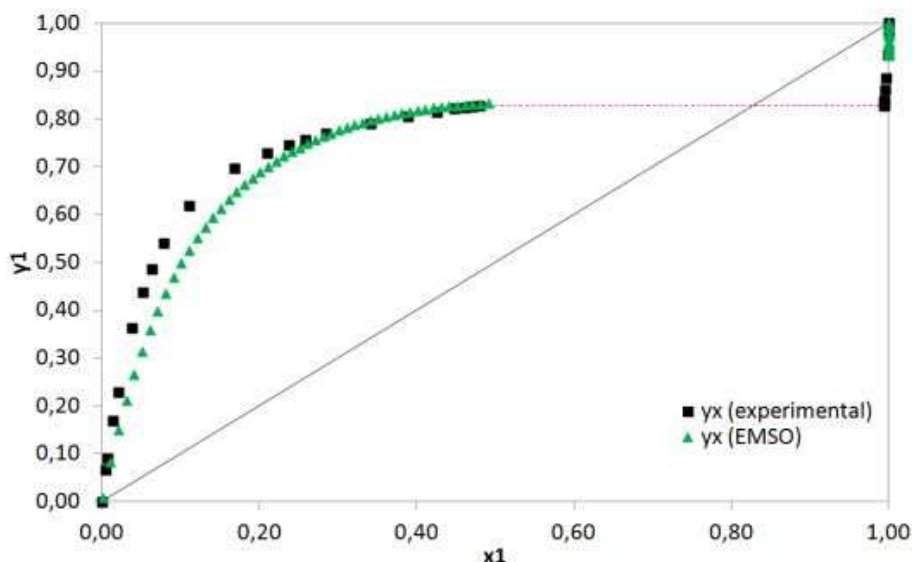


FIGURA 8: ELV da mistura água(1)-álcool isoamílico(2) a 1 atm: comparação das previsões no EMSO (UNIFAC-Dortmund/SRK) com dados experimentais (GMEHLING et al., 1982).

CONCLUSÕES

O simulador EMSO mostrou-se eficiente, de maneira que todos os dados foram coerentes às situações propostas no trabalho e obtenção dos resultados.

Todas as misturas analisadas apresentam perfis qualitativamente semelhantes aos observados na literatura, em que as frações molares de vapor dos componentes interessados passam por um aumento progressivo, com pouca variação em relação ao tempo. Simultaneamente, o estudo feito relacionou essa variação da fração molar com a temperatura, de modo que, na mistura etanol-água, a temperatura apresentou um declínio; na água-álcool isoamílico, houve um declínio e depois um aumento devido às propriedades das misturas; enquanto na mistura etanol-álcool isoamílico, a temperatura permaneceu constante, com variações pouco perceptíveis.

Conclui-se que existem inconsistências quando o equilíbrio líquido-líquido-vapor aparece no sistema, contudo, com a continuidade do processo, o ELV é normalizado e atinge os efeitos desejados.

Conclui-se, também, que, a partir da ciência destes efeitos de misturas binárias entre os três componentes do vinho estudado, os processos de destilação do bioetanol e do óleo fúsel se tornarão mais reais, visto que estes efeitos térmicos dão uma noção mais qualitativa desta operação unitária.

O conhecimento do comportamento do equilíbrio líquido-vapor dos sistemas estudados pode ser utilizado como ponto de partida nos cálculos de projetos e de

processos nas operações de separação líquido-vapor para a obtenção do produto especificado (seja o bioetanol, o óleo fúsel, e mesmo a água).

Uma análise mais detalhada, incluindo a previsão do equilíbrio líquido-líquido-vapor, precisa ser implementada para que se tenha o preenchimento das lacunas encontradas quando este tipo de equilíbrio surgiu. Entretanto, em termos qualitativos, a metodologia abordada gerou resultados satisfatórios.

REFERÊNCIAS

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS-CGEE. **Bioetanol de Cana-de-Açúcar**: Energia para o Desenvolvimento Sustentável. Organização BNDES e CGEE. Rio de Janeiro: BNDES; CGEE, 2008. 326p.

BRITO, F. O. **Avaliação da influência da pressão, temperatura e condições de operação sobre um sistema de destilação fracionada de uma solução glicerínica proveniente de uma unidade de produção de biodiesel**. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2010.

FERREIRA, M. C. **Estudo do processo de destilação do óleo fúsel**. 2012. 228f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Departamento de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas. Programa de pós-graduação em Engenharia de Alimentos. Campinas. 2012.

FRITZEN, N. A.; LUIZ, E. P.; DALANHOL, R. L. **Fabricação de álcool**. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Engenharia Bioquímica. 2012. Disponível em <<http://pt.scribd.com/doc/58036270/alcool>>. Acesso em Março/2015.

GMEHLING, J.; ONKEN, U.; ARLT, W. **Vapor-liquid equilibrium data collection - Organic Hydroxy Compounds: Alcohols**. Frankfurt: DECHEMA, 1982.

ITO, V. M. **Otimização de Colunas de Destilação Complexas**. Faculdade de Engenharia Química. Universidade Federal de Campinas. Programa de Mestrado. Campinas. 2002.

SCHMIDT JUNIOR, J. C. **Avaliação de desempenho efetivo de colhedora de cana-de-açúcar (Saccharum spp)**. Universidade de São Paulo. Piracicaba. 2011.

LEI, Z.; CHEN, B.; DING, Z. **Especial Distillation Processes**. Pequim: Elsevier, 2005.

SECCHI, A. R.; SOARES, R. P. **EMSO: A New Environment for Modelling, Simulation and Optimisation**. Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em <<http://www.vrtech.com.br/>>, 2003.

SILVA, J. I. S. **Simulação dinâmica do processo de destilação de bioetanol em**

simulador baseado em equações (EMSO). 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2012.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar. Disponível em <<http://www.unica.com.br/>>, 2014.

VAN NESS, H. C; SMITH, J. M.; ABBOTT, M. M. **Introdução à termodinâmica da Engenharia química**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2007.

VRTECH. VRTherm. **A software to predict thermodynamics and physical properties of complex mixtures and pure substances**. Disponível em <<http://www.vrtech.com.br/>>, 2005.