

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM EVAPORADOR DE SUCO DE LARANJA UTILIZANDO UM SIMULADOR INDUSTRIAL DE PROCESSOS

José Maximiano Candido Neto; Wagner André dos Santos Conceição; Paulo Roberto Paraíso; Luiz Mario de Matos Jorge*.

PEQ - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UEM - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR.

Resumo. Os simuladores de processo são cada vez mais aplicados nas atividades de projeto e análise de operações da indústria. Nas últimas décadas, vários simuladores comerciais foram desenvolvidos, entre eles o HYSYS, que foi desenvolvido inicialmente para aplicações voltadas à petroquímica, mas que com adaptações pode ser utilizado na simulação das condições operacionais de outras áreas como da indústria alimentícia. A evaporação do suco de laranja é uma etapa do processamento de concentração que visa à separação da água com o aquecimento da mistura, com alto consumo de energia. Logo, a modelagem e simulação de processos utilizando simuladores como o HYSYS, se torna muito atrativa devido à possibilidade de estudos na planta industrial sem necessidade de experimentação, uma vez o processo estando modelado é possível obter informações rápidas e confiáveis. Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que o suco hipotético de laranja modelado no HYSYS através da solução de sacarose em água representou bem o suco real obtendo-se desvio menor 10% para a propriedade condutividade térmica. O modelo do evaporador de filme descendente para concentração de suco de laranja construído no HYSYS pela associação do trocador de calor e do vaso separador flash mostrou-se através das simulações bastante coerente com os dados experimentais do processo o que indica grande potencial para ser utilizado como ferramenta de análise, simulação e otimização da operação de concentração de sucos de laranja em evaporadores industriais.

Palavras-chave: Evaporadores. Modelagem. Simulação. Suco de laranja. HYSYS.

Behavior analysis of an orange juice evaporator using an industrial process simulator. The process simulators are increasingly used in the activities of design and analysis of industry operations. Recently, several commercial simulators have been developed, including HYSYS, which was initially developed for applications related to petrochemicals, but with modifications can be used to simulate the operating conditions of other areas such as the food industry. The evaporation of orange juice is a processing step that aims to concentrate the separation of water by heating the mixture, with high energy consumption. Therefore, processes modeling and simulation using simulators such as HYSYS becomes very attractive due to the possibility of studies in the plant without the need of experimentation, since the process being modeled it is possible to obtain fast and reliable information. The results of this study showed that hypothetical orange juice modeled in HYSYS through the sucrose solution in water represented well and the real juice obtaining a deviation less than 10% for the property thermal conductivity. The model of falling film evaporator for concentrating orange juice built in HYSYS by the association of the heat exchanger and flash separator vessel proved to be fairly consistent through the simulations with the experimental data of the process which indicates great potential for use as analysis tool, simulation and optimization of the concentration of orange juice in industrial evaporators.

Keywords: Evaporators. Modeling. Simulation. Orange juice. HYSYS.

* E-mail: lmmj@deq.uem.br

1 Introdução

As frutas tropicais sempre geraram grande interesse, sobretudo internacional. A fruticultura é estratégica para o agronegócio brasileiro. Com um superávit de US\$ 267 milhões em 2003, o setor ocupa uma área de 3,4 milhões de hectares. Hoje, o mercado interno absorve 21 milhões de toneladas/ano e o excedente exportável é de cerca de 17 milhões de toneladas. Com uma fruticultura diversificada, o Brasil é um dos maiores pólos mundiais de produção de sucos de frutas. No ano de 2004, as exportações do setor alcançaram US\$ 1,25 bilhão (REZZADORI; BENEDETTI, 2009).

A laranja representa aproximadamente 49% da produção brasileira de frutas. Em 2007, a produção de laranja foi de 18.500.478 t e no ano de 2008 a safra ultrapassou 18.580.908 t. Dentre os estados brasileiros que mais se destacam na produção de cítricos estão São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Sergipe, Rio Grande do Sul, Paraná e Goiás. A maior parte da produção brasileira de laranjas destina-se à indústria de suco, e está concentrada no estado de São Paulo, sendo responsável por 70% das laranjas e 98% do suco que o Brasil produz (REZZADORI; BENEDETTI, 2009).

O Brasil é o maior produtor mundial de suco de laranja, sendo responsável por 80% do comércio mundial de suco de laranja concentrado congelado de um total global de 1,4 milhões de toneladas métricas em 2001 (FILHO, 2005; MARTINS, 2006). Neste contexto o mercado para os sucos concentrados possui um grande potencial de expansão, e esta é uma das motivações para se estudar processos que mantenham as características da fruta no produto final, já que os requisitos de qualidade e as regulações fitossanitárias têm importância fundamental para os grandes importadores, Estados Unidos, União Européia e Japão, os quais têm as regras mais rígidas de controle (MARTINS, 2006).

Muitas aplicações de simulação de processos são encontradas voltadas a processos químicos industriais, no entanto pouquíssimas aplicações são encontradas voltadas a modelagem e simulação de processos alimentícios industriais (CHAWANKUL *et al.*, 2001). Considerando esse argumento, a modelagem e simulação de processos alimentícios utilizando simuladores como o HYSYS, que se destaca pela qualidade do seu banco de dados e relativa facilidade na utilização, pode contribuir de forma decisiva, auxiliando na determinação das melhores condições de processamento e de projeto, visando à redução de custos nas indústrias já instaladas. Tais condições podem propiciar um consumo menor de energia e um nível mais elevado de qualidade no produto final.

Entretanto assim como os outros principais simuladores comerciais, também o HYSYS possui os seus blocos de simulação e banco de dados voltados à indústria petroquímica, evidenciando a necessidade de comprovar e, ou, adequar a aplicabilidade destes simuladores a outros seguimentos industriais, como o setor de concentração de sucos (SEIDER *et al.*, 1999).

A evaporação, empregada no setor de sucos, tem por objetivo aumentar a concentração de sólidos totais para reduzir a atividade de água, contribuindo para a conservação do produto final. Também pode ser função da evaporação como etapa antecedente a outras operações unitárias tais como a desidratação, o congelamento e a esterilização visando à redução do peso e volume dos alimentos facilitando e reduzindo os custos de transporte, armazenamento e distribuição (ORDONEZ, 2005).

Os evaporadores são equipamentos amplamente usados na indústria alimentícia nas operações unitárias de concentração e separação. Em particular, evaporadores de filme descendente que tem pequenos tempos de residência e relativamente grandes coeficientes de transferência de calor, apresentam o melhor desempenho para concentração de alimentos que são sensíveis ao calor e não toleram altas temperaturas por muito tempo. Esse tipo de evaporador é o mais utilizado em processos de concentração de sucos (CHAWANKUL *et al.*, 2001).

O funcionamento do evaporador de filme descendente é semelhante a um trocador de calor multitubular operando sob vácuo, contudo a alimentação é realizada na parte superior e é aquecida indiretamente por um fluido de aquecimento até entrar em ebulição durante o percurso descendente até a saída na parte inferior do equipamento. Ao atingir o ponto ebulição, bolhas de vapor são formadas, subindo até a parte superior do trocador de calor. O vapor formado encontra um anteparo onde sofre uma separação de fases: o vapor formado por água e componentes voláteis do suco e o líquido constituído de sólidos concentrados. A evaporação é uma etapa consumidora de grande quantidade de energia e a possibilidade de economizá-la deve ser sempre um fator relevante na redução dos custos industriais (JORGE *et al.*, 2010).

Diversos processos que têm importâncias industriais, como a destilação, a absorção, extração e a evaporação colocam em contato duas fases que não estão em equilíbrio. A velocidade com que uma espécie química é transferida de uma para outra fase depende do grau de afastamento do sistema em relação ao equilíbrio e, por isso, o tratamento quantitativo destes processos de transferência exige o conhecimento dos estados de equilíbrio do sistema. Tal conhecimento se faz através de estimativas do parâmetro coeficiente de atividade (CUSTÓDIO, 2003).

O modelo termodinâmico molecular NRTL (*Non-Random Two Liquid*), é uma extensão da equação de Wilson e utiliza a mecânica estatística e o conceito de composição local para representar a estrutura líquida, mas a diferença com o modelo de Wilson é que o modelo NRTL é aplicável a sistemas com miscibilidade parcial, o que permite representar os equilíbrios líquido-vapor, líquido-líquido e líquido-líquido-vapor. Segundo Sandler (2003) este modelo é empiricamente usado para misturas líquidas fortemente não ideais representando suas propriedades de melhor que outras equações tais como Margules e Van Lar.

O objetivo geral desse trabalho foi desenvolver a modelagem em estado estacionário, simulação e análise da operação de concentração do suco de laranja, no equipamento evaporador, utilizando o simulador industrial de processos HYSYS. Os objetivos específicos foram de determinar a propriedade física condutividade térmica do suco de laranja através do HYSYS e comparar os dados com correlação experimental obtida por Boonsriudomsuk (1998). Adicionalmente foi feita a validação do modelo evaporação desenvolvido através de dados experimentais de processo baseados em Chawankul *et al.* (2001).

2 Materiais e Métodos

O desenvolvimento do trabalho foi seguido em duas etapas. A primeira etapa foi modelar o suco de laranja no HYSYS e a avaliação da propriedade física condutividade térmica. A segunda etapa foi fazer a modelagem, simulação e validação do evaporador para concentração do suco de laranja.

2.1 Modelagem do suco de laranja e avaliação da condutividade térmica

De um modo geral, o suco de laranja é composto por diversos componentes, sendo constituído em torno de 88% (m/m) de água e 8% (m/m) de carboidratos na forma de sacarose. A parte restante é formada por proteínas, sais minerais, ácido ascórbico e por componentes de estruturas complexas como retinol, tiamina, niacina e riboflavina. Todas estas estruturas obviamente interferem, individualmente, nas propriedades físico-químicas da solução (suco). Devido à pequena quantidade das outras substâncias em relação aos carboidratos (< 4% (m/m)), o suco de laranja foi considerado como uma solução de sacarose (C₁₂H₂₂O₁₁) e água. Esse conceito foi utilizado com eficiência por Prost *et al.* (2006) na modelagem e simulação de um evaporador de filme descendente em uma planta piloto para concentração de sucos.

A molécula da sacarose não está disponível diretamente para uso no HYSYS. Portanto utilizando a avaliação de distribuição de grupos por molécula através do método UNIFAC, foi construída uma molécula hipotética de acordo com o procedimento a seguir:

- Determinação da fórmula estrutural química do componente hipotético;
- Quantificação dos grupos básicos formadores da molécula de acordo com o método UNIFAC. Exemplos: C-H; C=C; C-C;
- Construção do componente no HYSYS de acordo com a quantificação dos grupos de contribuição no passo anterior e estimativa as propriedades.

Na Figura 1 é possível observar a área de trabalho do HYSYS para modelagem de compostos hipotéticos a serem adicionados no banco de dados, em particular para a substância sacarose. Todos os parâmetros do componente hipotético modelado foram simulados pelo HYSYS.

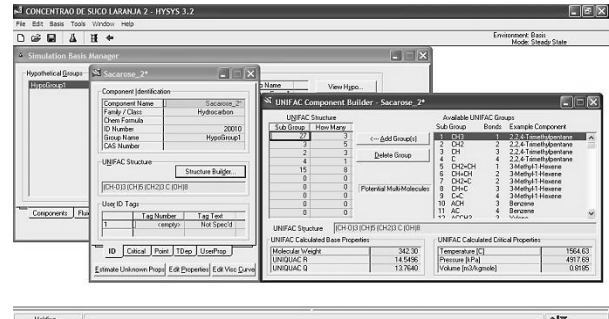


Figura 1: Área de trabalho do HYSYS na modelagem do composto hipotético sacarose.

Para verificar a coerência do suco hipotético de laranja simulado no HYSYS avaliou-se a propriedade condutividade térmica fazendo a comparação dos resultados com os valores obtidos por correlações empíricas em função da temperatura e quantidade de sólidos dissolvidos (concentração de sacarose) para o suco de laranja proposta por Boonsriudomsuk (1998). As correlações abrangem as temperaturas “T” de 32 °C a 80 °C e a concentração de sólidos dissolvidos “B” de 5 - 40% (m/v) e são apresentadas pelas equações 1 e 2.

$$\% \text{ total de sólidos dissolvidos } S (\% \text{ m/v})$$

$$S = 1,294B + 3,2167 \quad (1)$$

$$\text{condutividade térmica } k (\text{J/m.s.}^\circ\text{C})$$

$$k = 0,54689 - 6,886 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,00206 T - 0,15732 S^2 - 0,2776 S \quad (2)$$

Portanto para comparação da condutividade térmica do suco de laranja, obtida de dados correlacionados frente às simulações no HYSYS, foi mantida constante a concentração de sólidos dissolvidos “B” igual a 6,5% e utilizou como variável a temperatura “T” de 32 °C a 80 °C.

2.2 Modelagem do evaporador

A modelagem do equipamento de concentração de suco de laranja foi realizada fazendo a emulação de um evaporador através dos módulos disponíveis no HYSYS, uma vez que este equipamento não está disponível diretamente no simulador. Os módulos utilizados para emulação do evaporador correspondem à associação de um trocador de calor tipo tubular e um vaso separador flash. Essa ideia descrita por Foust *et al.* (1982) diz que um evaporador em sua forma básica é constituído por um trocador de calor, capaz de elevar

a temperatura da solução até o ponto de ebulição, e um dispositivo para separar a fase vapor do líquido em ebulição. Esse conceito foi utilizado por Chawankul *et al.* (2001) para modelar um evaporador de filme descendente de concentração do suco de laranja no simulador ASPENPLUS e por Jorge *et al.* (2010) para concentração de caldo de cana de açúcar, no simulador HYSYS.

Os dados do equipamento de evaporação de suco de laranja em escala laboratorial/piloto foram baseados em Chawankul *et al.* (2001) e utilizados como base para simulação da concentração de suco no HYSYS encontrando-se apresentados na Tabela 1.

Um esquema do sistema de evaporação pode ser observado na Figura 2. O “reservatório de suco diluído” armazena o suco natural na concentração que é extraído das laranjas e é bombeado para o evaporador. O evaporador é encamisado e o fluido de aquecimento entra na forma de vapor (entrada de vapor saturado) e sai como vapor condensado ou sub-resfriado (saída de condensado) sem entrar em contato direto com o suco. O suco entra na parte superior do evaporador (entrada de suco) e sai na parte inferior (saída de suco concentrado). O motor no topo do evaporador é responsável por transferir energia mecânica para movimentar um eixo com uma placa retangular dentro do equipamento. A placa retangular ao girar em alta velocidade faz com que o suco seja colocado em contato com a parede interna aquecida do evaporador formando um filme líquido de pequena espessura e com escoamento descendente. Nesse filme ocorre a evaporação de água e componentes voláteis fazendo a concentração do suco de laranja. O condensador serve para fazer a condensação dos vapores de água e recuperação dos componentes voláteis durante a concentração do suco (saída de vapor de água e componentes voláteis).

mistura de vapor d’água e suco de laranja concentrado. Esta corrente não existe no processo real. O separador flash é usado para separar o suco concentrado do vapor d’água.

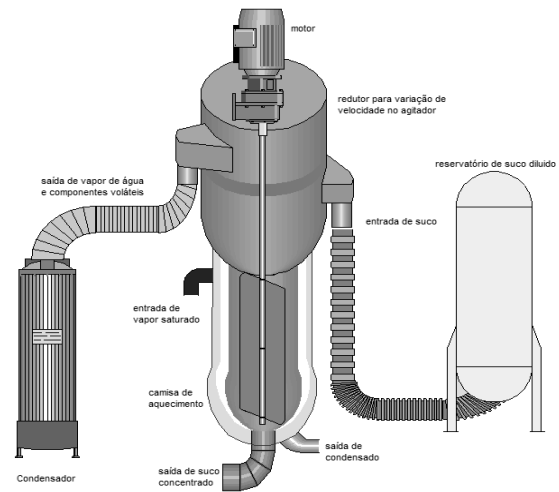


Figura 2: Diagrama esquemático do sistema laboratorial/piloto de evaporação de suco de laranja.

Tabela 1: Dados operacionais do evaporador de suco de laranja utilizados como base na simulação.

Discriminação	Informação
Material dos tubos	aço-inóx
Altura do evaporador	4,5 m
Diâmetro do evaporador	0,108 m
Espessura da parede interna do evaporador	0,0034 m
Área de troca térmica	0,251 m ²

Na Figura 3 pode-se observar o modelo construído no HYSYS para o evaporador utilizado na concentração de suco de laranja. A corrente “suco natural” que entra no trocador de calor representa o suco de laranja em sua concentração natural. O fluido de aquecimento é o vapor d’água saturado o qual entra trocador de calor a 1,5 bar e 111 °C e sai na forma de condensado. O produto do trocador de calor (suco aquecido) é uma

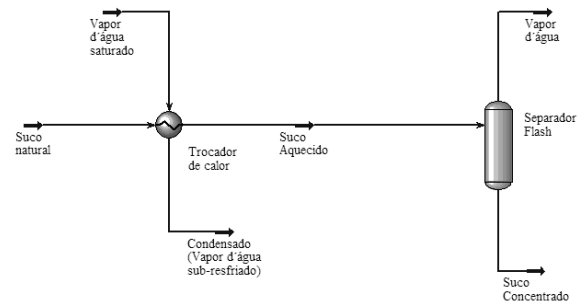


Figura 3: Modelo do evaporador de suco de laranja no HYSYS.

As correntes de saída do separador flash representam os dois produtos reais do processo de concentração do suco de laranja. A pressão no separador flash é assumida como a mesma no trocador de calor, ou seja, ocorre a operação sob vácuo parcial a 300 mmHg. Foi assumida a condição adiabática tanto no trocador de calor quanto no separador flash.

Na predição do equilíbrio de fases e cálculo do coeficiente de atividade, foi utilizado o modelo termodinâmico NRTL. O coeficiente global de troca térmica foi deixado como parâmetro a ser estimado pelo HYSYS sendo assim necessitou-se fazer uma rotina de ajuste de convergência na simulação fixando a vazão de saída de suco concentrado no separador flash de acordo com os dados experimentais através do ajuste da temperatura da corrente de entrada de “suco aquecido” no separador flash. Este procedimento influencia diretamente na vazão da corrente de vapor saturado d’água.

Foram feitas simulações considerando os dados experimentais de 13 ensaios obtidos de Chawankul *et al.* (2001). Os ensaios de 1 a 8 com vazões de alimentação distribuídas em intervalos iguais de 13 - 21 kg/h e os ensaios de 9 a 13 com vazões de alimentação distribuídas em intervalos iguais de 60 - 117 kg/h. A concentração da corrente de alimentação foi em todos os ensaios 6,5 °Brix.

Para validação do modelo implementado no HYSYS utilizou-se como comparação os dados experimentais de Chawankul *et al.* (2001). E também os resultados de simulação feitos pelos mesmos autores utilizando o simulador ASPENPLUS no qual foi utilizado o coeficiente global de troca térmica, obtido por correlações.

3 Resultados e Discussões

3.1 Avaliações da condutividade térmica

A Figura 4 apresenta o comportamento da condutividade térmica do suco de laranja pela influência da temperatura para dados obtidos por correlação e simulação no HYSYS.

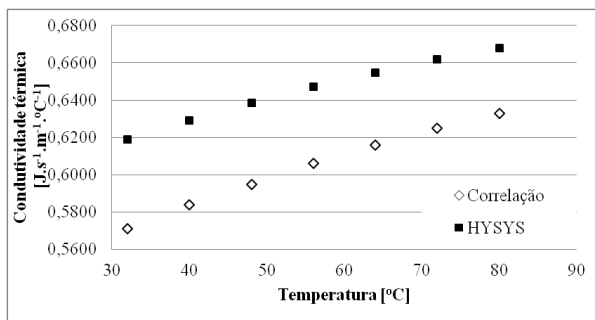


Figura 4: Comportamento da condutividade térmica do suco de laranja com a temperatura.

Na Figura 4 pode-se observar que o comportamento da condutividade térmica influenciado pela temperatura apresentou o mesmo comportamento através da correlação proposta por Boonsriudomsuk (1998) e na simulação através do HYSYS sendo crescente com o acréscimo da temperatura.

A comparação entre os valores correlacionados e simulados no HYSYS para a condutividade térmica do suco de laranja está apresentada na Figura 5. Analisando a Figura 5 pode-se observar que o valor da condutividade térmica do suco de laranja simulada no HYSYS apresentou boa coerência com os valores correlacionados obtendo-se um desvio máximo menor que 10% e uma correlação dada por $R^2 = 1,00$.

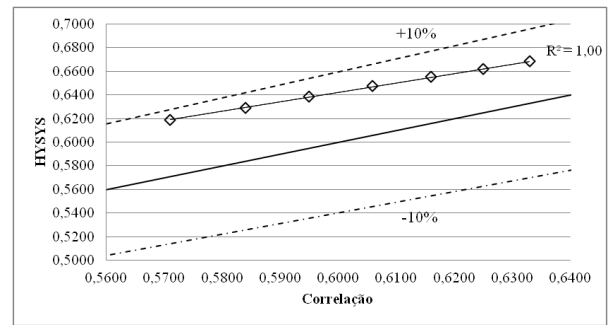


Figura 5: Comparação da condutividade térmica do suco de laranja.

3.2 Modelagem do sistema de evaporação

As Figuras 6 e 7 apresentam a comparação entre os valores simulados no HYSYS e os valores experimentais e simulados no ASPENPLUS obtidos de Chawankul *et al.* (2001) para a vazão de fluido de aquecimento e concentração do produto final, respectivamente.

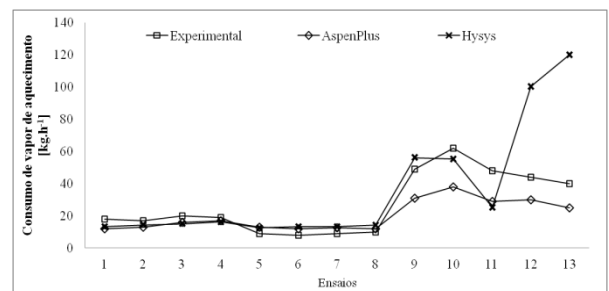


Figura 6: Comparativo do consumo de vapor de aquecimento para o modelo de evaporação de suco de laranja obtido pelo HYSYS e ASPENPLUS.

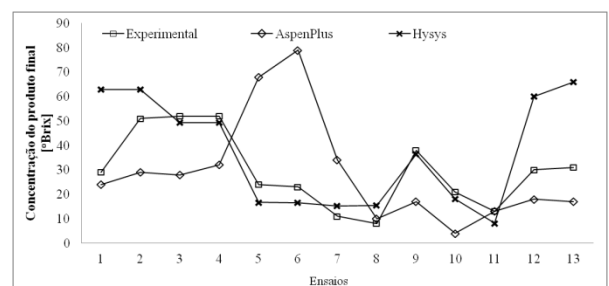


Figura 7: Comparativo da concentração do produto final para o modelo de evaporação de suco de laranja obtido pelo HYSYS e ASPENPLUS.

A partir da Figura 6 pode-se observar que os dados simulados no HYSYS apresentaram boa coerência com os dados simulados e experimentais obtidos de Chawankul *et al.* (2001) para vazões de alimentação de 13,0 kg/h a 88,3 kg/h, ou seja, nos ensaios 1 a 11. Nessa faixa de ensaios 5 vezes os valores simulados no HYSYS foram mais próximos dos valores experimentais que os valores simulados para mesmo processo por Chawankul *et al.* (2001).

Na Figura 7 pode-se observar que os dados de concentração do produto final para o modelo de evaporação no HYSYS nos ensaios 2 a 11 representaram melhor o equipamento que a simulação realizada por Chawankul *et al.* (2001) no simulador ASPENPLUS, sendo 8 vezes mais próximos dos valores experimentais. Nos ensaios 12 e 13 os valores simulados de concentração do produto final no HYSYS foram maiores que os dados experimentais e que obtidos no ASPENPLUS, porém apresentaram entre si comportamento análogo.

Os valores dos consumos de vapor d'água (Figura 6) simulados no HYSYS para os ensaios 12 e 13, com vazões de alimentação de 102,8 kg/h e 107,0 kg/h respectivamente, apresentaram-se discrepantes em relação ao comportamento dos dados experimentais, mas esperado em função do aumento da vazão de alimentação nestes ensaios. Os valores elevados de consumo de vapor d'água são coerentes se observarmos que também as concentrações do produto, estimadas pelo HYSYS, ficaram muito acima das experimentais e simuladas no AspenPlus (Figura 7), o que demandaria um consumo adicional de vapor d'água, sugerindo que as informações fornecidas no artigo e utilizadas nas simulações poder conter alguma imprecisão nestes dois casos (ensaios 12 e 13).

4 Conclusões

O suco hipotético de laranja, simulado no HYSYS, através da fração mássica de carboidrato constituinte, representado pela sacarose, em solução com água foi uma aproximação satisfatória apresentando desvio menor que 10% para propriedade condutividade térmica em relação aos valores desse parâmetro no suco real.

O modelo NRTL, para cálculo do coeficiente de atividade, apresentou-se coerente frente à comparação entre as simulações no HYSYS e os experimentais.

A avaliação dos resultados quanto ao comportamento do consumo de vapor de aquecimento e da concentração do produto final revelaram que a modelagem e simulação do processo de concentração de suco de laranja utilizando o HYSYS estão bastante coerentes com as condições reais do equipamento piloto indicando potencial para ser utilizado como ferramenta de análise, simulações e otimizações da operação de concentração de sucos em evaporadores.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico) e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro.

6 Referências

- BOONSRIUDOMSUK, S. **Thermophysical properties of orange juice**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade King Mongkut's de Tecnologia Thonburi. Bangkok, Tailândia, 1998.
- CHAWANKUL, N.; CHUAPRASERT, S.; DOUGLAS, P.; LUEWISUTTHICHAT, W. Simulation of an agitated thin film evaporator for concentrating orange juice using AspenPlus™. **Journal of Food Engineering**, v. 47, p. 247-253, 2001.
- CUSTÓDIO, A. F. **Modelagem-Simulação do processo de separação de óleo de soja-hexano por evaporação**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP, 2003.
- FILHO, W. G. V. **Tecnologia de bebidas**. 1ª edição. São Paulo: Edgar Blucher, 2005.
- FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; ANDERSON, L. B. **Princípios das operações unitárias**, Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.
- JORGE, L. M.; RIGHETTO, A. R.; POLLI, P. A.; SANTOS, O. A. A.; MACIEL FILHO, R. Simulation and analysis of a sugarcane juice evaporation system. **Journal of Food Engineering**, v.99, p. 351–359, 2010.
- MARTINS, F. L. **Desenvolvimento experimental, modelagem e simulação do processo de evaporação osmótica para concentração de soluções de sacarose contendo aroma de frutas tropicais**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- ORDONEZ, J. A. **Tecnologia de alimentos: componentes dos alimentos e processos**. Porto Alegre. Artmed. v. 1. 2005.
- PROST, J. S.; GONZÁLEZ, M. T.; URBICAIN, M. J.; Determination and correlation of heat transfer coefficients in a falling film evaporator. **Journal of Food Engineering**, v.73, p. 320–326, 2006.
- REZZADORI, K.; BENEDETTI, S. Proposições para valorização de resíduos do processamento do suco de laranja. **2nd International Workshop Advances in Cleaner Production**. São Paulo – SP, 2009.
- SANDLER, S. I. **Chemical and Engineering Thermodynamics**, 2nd ed., John Wiley & Sons. 2003.
- SEIDER, W. D.; SEADER, J. D., **Process Design Principles**, John Wiley & Sons. 1999.