

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE EVAPORADORES DE MISCELA DE UMA DESTILARIA DE OLEO DE SOJA

E. R. A. PRADO<sup>1</sup>, A. TROMBETA<sup>1</sup>, L. V. DURANTE<sup>1</sup>, P. R. PARAISO<sup>1</sup> e L. M. M. JORGE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Química  
E-mail para contato: lmmj@deq.uem.br

**RESUMO** – A soja é a principal oleaginosa cultivada no mundo, o Brasil é o segundo maior produtor mundial. Com a crescente produção de óleo de soja, a redução do custo industrial é fundamental para ser competitivo. Na produção do óleo de soja a destilação da miscela, mistura de óleo e hexano tem destaque, pois há um elevado consumo de energia, sendo esta constituída por três evaporadores e um “*stripper*” separando o óleo bruto do hexano. A modelagem e simulação de processos utilizando simulador como o HYSYS se torna conveniente, possibilitando analisar a possível redução de consumo de vapor, pois é o insumo com alto custo industrial. Neste sentido, desenvolveram-se modelos para o óleo de soja, miscela e evaporadores de miscela, sendo validados com dados reais do processo e valores de propriedades encontradas na literatura. Os resultados obtidos pelo HYSYS mostraram que a modelagem e simulação estão coerentes com as condições reais do processo e próximo as encontrados na literatura.

## 1. INTRODUÇÃO

A industrialização de oleaginosas constitui-se num dos mais importantes setores do sistema agroindustrial, pela importância de seus produtos nas indústrias siderúrgicas, cosméticos e como matéria-prima no processo de alimentos para consumo animal e humano (BOSS, 2000).

No abastecimento e distribuição mundial das principais oleaginosas, a soja corresponde a 58,09% de todas as oleaginosas produzidas mundialmente. Destaca-se o crescimento do processamento/esmagamento de 2008 a 2011, que cresceu 8,91%. No abastecimento e distribuição mundial da soja, o Brasil é o segundo maior produtor, correspondendo a 28,93%, ficando atrás dos Estados Unidos da América, que corresponde a 31,98%. A China se destaca no setor de importação da soja, onde a quantidade importada cresceu 38,40% de 2008 a 2011. Este país representou 60,13% da soja importada mundialmente. O Brasil é o segundo país em exportação de soja com 32,41%, ficando atrás dos Estados Unidos da América que representam 44,21% das exportações mundial. No processamento da soja, a China se destacou a partir de 2010, quando se tornou líder no processamento do grão da soja, em 2011 correspondeu a 26,21% (Oilseeds, 2012).

A soja é a matéria-prima mais importante da cadeia de óleos vegetais no Brasil, a produção de óleos vegetais é composta, por mais de 90% de óleo de soja. No período 2004/2005 a produção de soja no Brasil correspondeu a 23,7% da produção mundial e a exportação do complexo de soja correspondeu a 31,5% no farelo e 26,2% no óleo, sendo o segundo exportador mundial destes produtos ([www.abiove.com.br](http://www.abiove.com.br)).

Tabela 1 - Composição do óleo de soja bruto e refinado

Componentes	Óleo de soja bruto	Óleo de soja refinado
Triacilgliceróis (%)	95,99 – 97,00	>99,00
Fosfolipídios (%)	1,50 – 2,50	0,003 – 0,045
Insaponificáveis (%)	1,6	0,3
Fitosteróis (%)	0,33	0,11 – 0,18
Tocoferóis (%)	0,15 – 0,21	0,01
Hidrocarbonetos (Esqualeno) (%)	0,014	0,01
Ácidos Graxos Livres (%)	0,3 – 0,7	< 0,05
Traços de Metais		
Ferra (mg/Kg)	1,0 – 3,0	0,1 – 0,3

Fonte: PERKINS, (1995).

A produção de óleo de soja envolve a recepção, tratamento, transporte e armazenamento e a extração do óleo por solvente (hexano), formando uma mistura entre óleo e solvente denominada de miscela. Na evaporação e destilação “flash”, ocorre à concentração do óleo na miscela, necessário para separar os componentes desta mistura e para isso acontecer, há um alto consumo de energia (Paraiso, 2001).

Na Figura 1, há uma destilação da miscela, onde ocorre a concentração do óleo vegetal, obtendo óleo vegetal bruto.

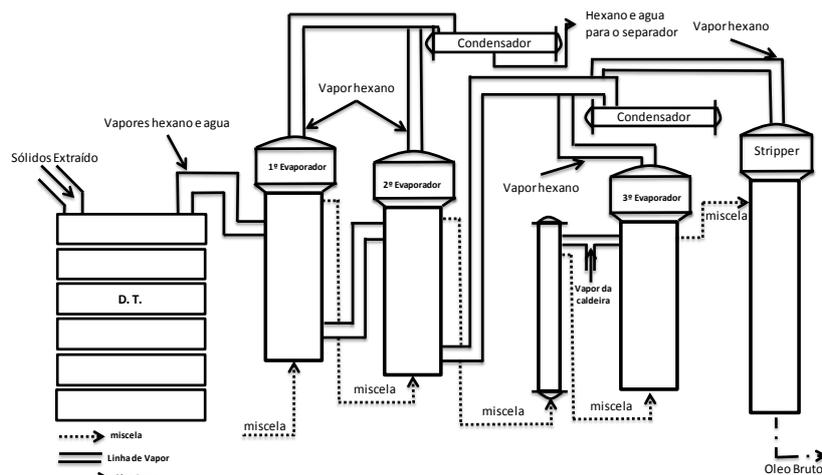


Figura 1 – Visão do processo de concentração (destilação) da miscela.

A separação destes componentes é denominada de destilação da miscela, que se compõe da evaporação e *stripper*, como demonstrado na Figura 1. Nestas operações, quantidades expressivas de energia são utilizadas na forma de vapor. O valor estimado é de 40 Kg de vapor por tonelada de soja processada (Jongeneelen, 1976). O vapor utilizado no processo industrial é o custo industrial mais impactante na produção. Realizar uma modelagem do processo de concentração de miscela é importante para analisar cada evaporador que constitui a destilação, verificando o consumo de vapor e simulando melhorias a serem implementadas. (Prado, 2013)

A destilação da miscela, demonstrada na Figura 1, tem a função de recuperar o hexano presente na miscela e obter o óleo bruto na saída da *stripper*. A miscela entra no primeiro evaporador com uma concentração de 26,0% e é aquecido com o gás do dessolventizador/tostador (DT), recuperando o hexano. Após passar inicialmente pelos três evaporadores a miscela sai com uma concentração aproximada de 97% de óleo.

A evaporação da miscela na indústria de óleo de soja gera uma corrente gasosa de hexano e outra líquida de miscela concentrada. Os equipamentos utilizados são evaporadores verticais, demonstrado na Figura 2, instalados em série, utilizando vapor saturado como fontes de calor para o aquecimento até o ponto de ebulição. Na indústria de fabricação de óleo de soja, parte do aquecimento é feita aproveitando o vapor saturado que sai do dessolventizador/tostador e outra parte é utilizando o vapor saturado de uma caldeira.

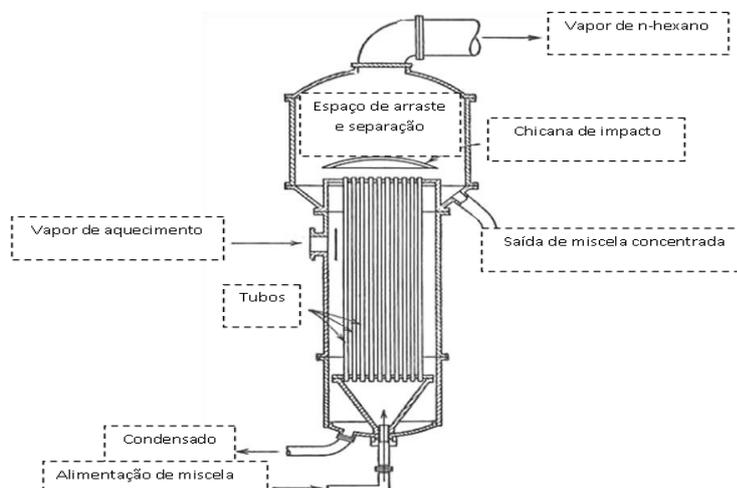


Figura 2 – Evaporador Vertical.

O evaporador demonstrado na Figura 2, funciona como trocador de calor onde vapor flui na parte externa dos tubos, de cima para baixo, e a miscela escoia na parte interna dos tubos, de baixo para cima sob vácuo. O óleo a altas temperaturas pode alterar as características físicas. Uma maneira utilizada no processo para diminuir o efeito da temperatura é trabalhando com uma pressão abaixo da atmosférica. (Zanetti, 1981). A evaporação é uma etapa consumidora de energia e a possibilidade de economizá-la é um fator relevante na redução dos custos industriais. Para economizar energia deve levar em conta a quantidade de calor transferida do fluido quente para o frio (Gonzales, 2010).

Dos balanços de massa e energia, Paraiso (2001), modelou e simulou a transferência de calor em um evaporador vertical no processo de concentração de miscela. Os valores utilizados pelo autor do coeficiente global de troca térmica foram da literatura, com características similares.

De acordo com Jorge, *et. al.* (2010), seguindo a tendência de outros simuladores comerciais, o HYSYS possui os seus blocos de simulação e banco de dados voltados à indústria petroquímica, evidenciando a necessidade de comprovar a aplicabilidade dos simuladores a outros seguimentos industriais, como o setor de óleos vegetais.

Santander, *et. al.* (2010), emulou o óleos vegetais no simulador por compostos da mistura, analisando suas propriedades. A simulação utilizou o modelo termodinâmico NRTL com parâmetros de interação ausentes na base do simulador, pelos métodos UNIFAC. O modelo termodinâmico molecular NRTL (nonrandom twoliquids), proposto por Sandler (2003), é uma extensão da equação de Wilson e utiliza a mecânica estatística e o conceito de composição local para representar a estrutura líquida. A diferença com o modelo de Wilson é que o modelo NRTL é aplicável com miscibilidade parcial, o que permite representar os equilíbrios líquido-vapor, líquido-líquido e líquido-líquido-vapor. Este modelo é

empiricamente usado em misturas líquidas não eletrolíticas, representando as propriedades de misturas não ideais em outras equações, como Margules e Van Laar (Sandler, 2003).

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver a modelagem em estado estacionário, simular e analisar a operação de evaporação da miscela de soja, utilizando o *software* HYSYS. Para a validação do modelo desenvolvido, foi realizada uma comparação com os dados reais da etapa de destilação da miscela de uma cooperativa agroindustrial.

## 2. MODELAGEM DO SISTEMA DE EVAPORAÇÃO NO HYSYS

Para equacionar o óleo de soja real por frações de ácidos graxos, foi realizada a modelagem do composto hipotético utilizado na pesquisa, quantificando cada ácido que compõem o óleo de soja, formando a corrente hipotético óleo bruto, demonstrada na Figura 3.

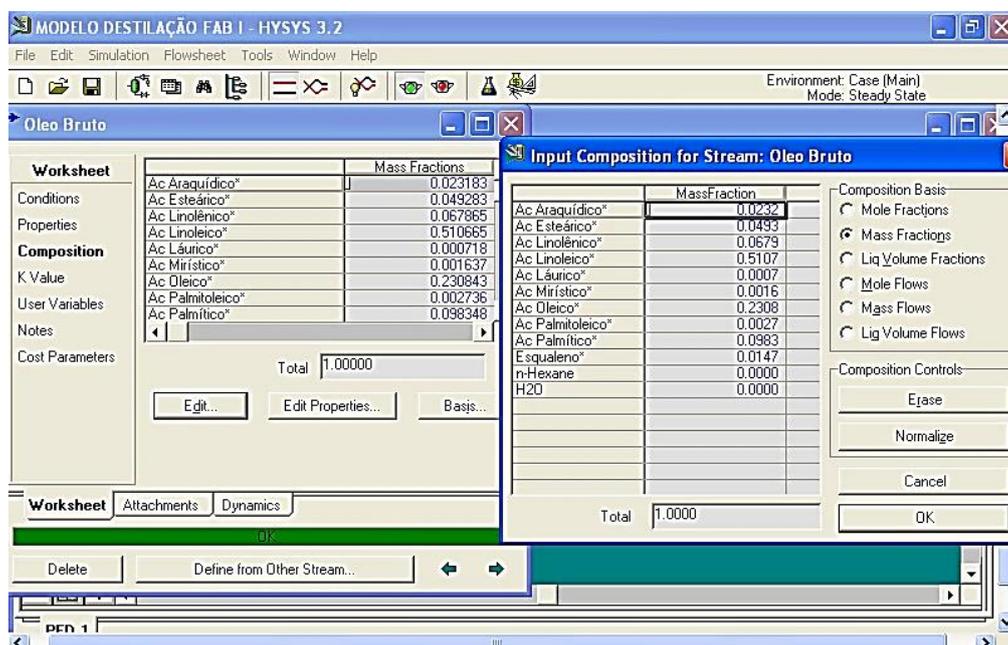


Figura 3 - Área de trabalho do HYSYS na modelagem da corrente óleo hipotético de soja.

Foram utilizados módulos disponíveis no HYSYS, para realizar a emulação de um misturador com duas correntes de entrada e uma de saída, sendo o óleo bruto e hexano as correntes de entrada e a miscela a de saída, como demonstrado na Figura 4.

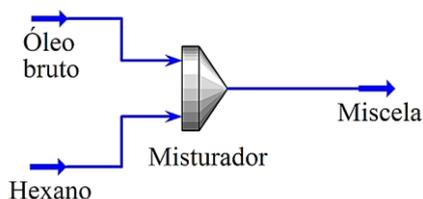


Figura 4 - Componente da área de trabalho do HYSYS na modelagem da miscela

O evaporador foi desenvolvido, a partir da associação de um trocador de calor tipo multi tubular e um vaso separador *flash*, demonstrado na Figura 5. Esta ideia foi descrita inicialmente por Foust, *et al* (1982) e refere-se ao evaporador como sendo um trocador de calor, capaz de elevar a temperatura da solução até o seu ponto de ebulição e separar a fase vapor do líquido em ebulição. Este mesmo conceito foi utilizado posteriormente por Boss

(2000), onde foi realizado a análise da concentração da miscela e por Jorge (2010), onde foi realizado a análise da concentração do caldo de cana de açúcar utilizando simulador HYSYS.

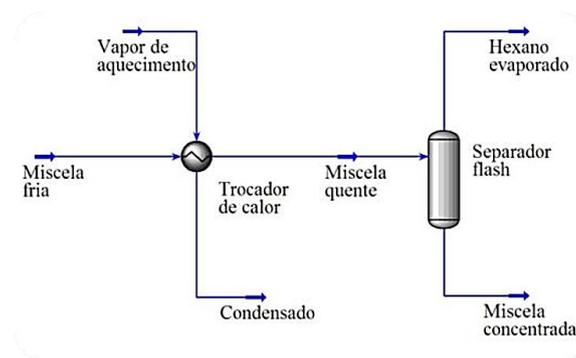


Figura 5 - Representação dos evaporadores no HYSYS

Seguindo este conceito desenvolveu-se o modelo dos evaporadores para concentrar miscela da extração de óleo de soja de uma Cooperativa Agroindustrial, utilizando o *software* HYSYS, representando cada evaporador pela associação de um trocador de calor multitubular a um vapor “flash”. A Figura 6 demonstra o modelo montado no HYSYS.

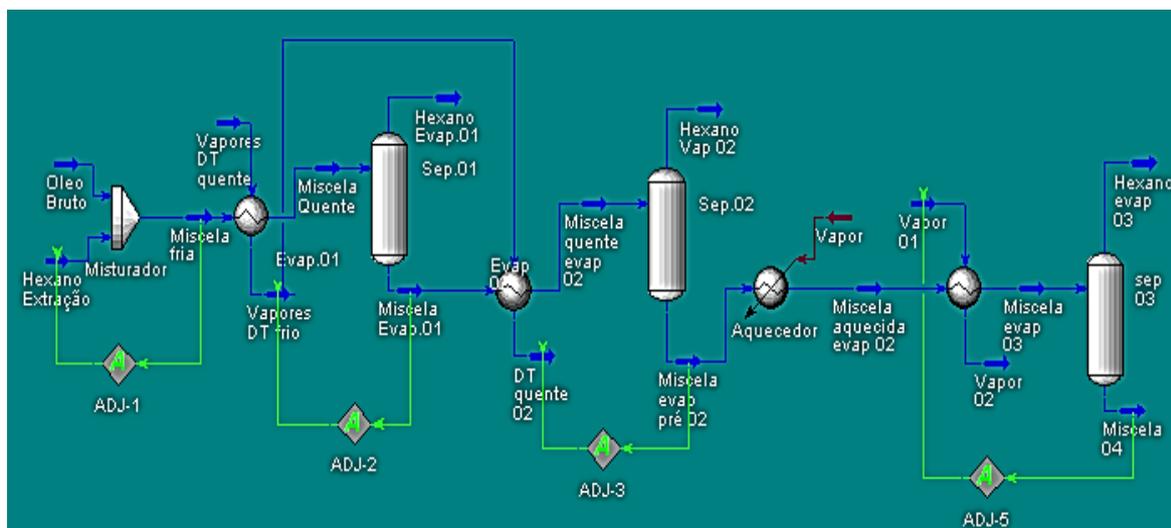


Figura 6 – modelo representativo do sistema de evaporação de miscela no HYSYS.

Na simulação do modelo representado pela Figura 6, o trocador de calor representa a calandra do evaporador e de acordo com Tema (1998), admite-se um passo no casco e um passo nos tubos, com orientação vertical, espaçamento máximo entre os espelhos e classificação A-E-L, conforme as normas apresentadas.

O óleo de soja é constituído por 95% de ácidos orgânicos saturados e insaturados, denominados de ácidos graxos e menos de 5% por metais, esteróis, tocoferóis, esqualenos e ácidos graxos livres, considerando que o óleo de soja é constituído por uma mistura de ácidos graxos. As estruturas moleculares do ácido graxo não estão disponíveis na base do HYSYS, para tanto utilizou a avaliação de distribuição de grupos de moléculas, do método UNIFAC. Foram montadas moléculas hipotéticas dos ácidos graxos Oleico, Linoleico, Linolênico, Palmitoléico, Araquidico, Esteárico, Palmítico, Mirístico, Láurico e Esqualeno. Na modelagem do processo dos evaporadores, as frações mássicas dos ácidos graxos no óleo de soja, foram utilizadas o óleo de soja processado na cooperativa agroindustrial. Os demais parâmetros dos ácidos graxos foram estimados pelo HYSYS. No modelo do processo dos

evaporadores de miscela, os equilíbrios de fases e coeficientes de atividades foram estimados utilizando os modelos termodinâmicos NRTL e Peng-Robinson selecionados no *software* utilizado. O conceito de NRTL baseia-se na hipótese de Wilson que a concentração em torno da molécula é diferente do volume do material. Esta diferença é devida à energia de interação da molécula central com as moléculas de seu próprio tipo. O modelo NRTL é aplicável a equilíbrios líquido-vapor, líquido-líquido e líquido-líquido-vapor.

O coeficiente global de troca térmica foi estimado pelo HYSYS, para tanto foram desenvolvidas quatro rotinas de convergência na simulação da modelagem dos evaporadores, fixando as concentrações de hexano em cada corrente de saída dos separadores, ajustando a vazão mássica de hexano na entrada do extrator, as frações de vapor na saída do gás do DT, nos evaporadores iniciais e a vazão mássica de vapor saturado no início do último evaporador. Os parâmetros da simulação do modelo da Figura 6 são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – parâmetros operacionais da cooperativa agroindustrial, utilizados nas simulações.

Descrição	1º Evap.	2º Evap.	3º Evap.
Vazão Mássica da Miscela na entrada (Kg/h)	87.190	-	-
Fração mássica do óleo na entrada (%)	23,5	-	-
Vazão mássica do Hexano na saída (Kg/h)	53.040	-	-
Temperatura da Miscela, na entrada (°C)	58	60	110
Temperatura corrente de aquecimento (°C)	80	75	180
Pressão de Operação (mmHg)	520	520	520
Área de troca térmica (m <sup>2</sup> )	1066	350	266
Número de Tubos	677	915	556
Comprimento dos tubos (m)	10	5	6

#### 4. RESULTADOS

Nas condições operacionais da Tabela 2, foram comparados com os dados do processo industrial, cujos resultados encontram-se nas tabelas abaixo. Deixando constante a vazão de entrada da miscela, utilizada a mesma vazão do HYSYS, onde na entrada de miscela do segundo e terceiro evaporador houve um desvio de 0% e 0,03% respectivamente, este desvio observado deve-se ao valor de vazão imposta para a vazão de hexano na saída do primeiro evaporador para ocorrer à convergência no HYSYS. Para o hexano na saída do segundo e terceiro evaporadores o desvio observado foi de 0,49% e 0,05%, indicando que há uma grande proximidade dos valores reais do processo industrial da cooperativa agroindustrial.

Tabela 3 – Previsões do HYSYS, frente às medidas operacionais do 1º Evaporador.

Variáveis	1º Evaporador		
	COCAMAR	HYSYS	Desvio
Vazão mássica da miscela na saída (Kg/h)	34.150	34.150	0%
Fração mássica de óleo na saída (%)	60	60	0%
Temperatura da miscela na saída (°C)	61	61,99	1,62%
Vazão do fluido de aquecimento (Kg/h)	-	34.870	-
Coefficiente de transferência de calor (Kcal/h. m <sup>2</sup> . °C)	-	282,99	-

Tabela 04 – Previsões do HYSYS, frente às medidas operacionais do 2º Evaporador.

Variáveis	2º Evaporador		
	COCAMAR	HYSYS	Desvio
Vazão mássica da miscela na entrada (Kg/h)	34.150	34.150	0%
Vazão mássica da miscela na saída (Kg/h)	31.510	31.520	0,03%
Vazão mássica do Hexano na saída (Kg/h)	2.640	2.627	0,49%
Fração mássica do óleo na entrada (%)	60	60	0%
Fração mássica de óleo na saída (%)	65	65	0%
Temperatura da miscela na saída (°C)	59	58,43	0,97%
Vazão do fluido de aquecimento (Kg/h)	-	34.870	-
Coefficiente de transferência de calor (Kcal/h. m <sup>2</sup> . °C)	-	35,60	-

Tabela 5 – Previsões do HYSYS, frente às medidas operacionais do 3º Evaporador.

Dados do processo	3º Evaporador		
	COCAMAR	HYSYS	Desvio
Vazão mássica da miscela na entrada (Kg/h)	31.510	31.520	0,03%
Vazão mássica da miscela na saída (Kg/h)	21.000	21.010	0,05%
Vazão mássica do Hexano na saída (Kg/h)	10.500	10.510	0,05%
Fração mássica do óleo na entrada (%)	65	65	0%
Fração mássica de óleo na saída (%)	97,5	97,5	0%
Temperatura da miscela na saída (°C)	110	111	0,91%
Vazão do fluido de aquecimento (Kg/h)	-	2.779	-
Coefficiente de transferência de calor (Kcal/h. m <sup>2</sup> . °C)	-	71,32	-

Analisando a fração mássica de óleo, observa-se que não houve desvio na concentração do óleo na miscela de saída dos três evaporadores, observado nas tabelas 3, 4 e 5. Os valores previstos por simulação foram exatamente os mesmos do processo industrial.

Comparando as temperaturas na saída dos evaporadores, observa-se um desvio de -1,62%, 0,97% e 0,91% no primeiro, segundo e terceiro evaporador, respectivamente. É interessante observar que os valores dos coeficientes de transferência de calor, simulados pelo HYSYS, apresentam valores distintos para os três evaporadores. O 1º evaporador apresenta o maior valor de coeficiente de transferência de calor (282,99 Kcal/h. m<sup>2</sup>. °C), enquanto que os outros dois evaporadores subsequentes apresentam valores substancialmente inferiores (35,60 e 71,32 Kcal/h. m<sup>2</sup>. °C), correspondendo a resistências térmicas (1/U.A) de 3,31x10<sup>-6</sup>, 8,02x10<sup>-5</sup> e 5,27x10<sup>-5</sup> h.°C/kcal, para o 1º, 2º e 3º evaporador respectivamente, indicando que o 2º evaporador apresenta um desempenho térmico inferior ao 1º e 3º evaporador, sugerindo a necessidade de limpeza para remoção de possíveis incrustações no 2º evaporador.

Com relação às vazões de miscela, hexano e a concentração de óleo nas correntes de saída, houve um desvio pequeno, mesmo sendo os parâmetros dos componentes hipotéticos do óleo de soja aproximados a partir das frações dos ácidos graxos estimados pelo HYSYS, os resultados mostram que esse procedimento foi adequado.

## 5. CONCLUSÕES

O modelo do sistema de evaporadores de miscela, incorporando uma estrutura hipotética de óleo de soja no HYSYS, mostrou-se adequado e apresentou um desvio máximo de 1,66% com relação à temperatura da miscela, não houve desvios em relação à fração mássica de óleo, ambos medidos na saída do 1º evaporador.

O maior coeficiente global encontrado foi no 1º evaporador com valor de 282,99 Kcal/h. m<sup>2</sup>. °C e o menor foi de 35,60 Kcal/h.m<sup>2</sup>.°C, no segundo evaporador. Com os valores dos coeficientes de transferência de calor dos três evaporadores, analisando as resistências (1/U.A) dos mesmos, indicam que no 2º evaporador sugere um efeito de incrustação, pois no mesmo apresenta uma resistência de 8,02x10<sup>-5</sup> h.°C/kcal, enquanto o 1º e 3º evaporadores, apresentam uma resistência de 3,31x10<sup>-6</sup> e 5,27x10<sup>-5</sup> h.°C/kcal.

A modelagem e simulação do processo de evaporação da miscela, utilizando o HYSYS, conduziram a valores coerentes com as condições reais do processo, logo pode se utilizar como ferramenta computacional no processo de análise, simulação e otimização da destilação do óleo de soja, onde ocorre a concentração da miscela em três evaporadores.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABIOVE – Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, 2012.
- BOSS, E. A., *Análise do desempenho de plantas de extração de óleos convencionais e de processos supercríticos*, Unicamp, Campinas-SP (dissertação de mestrado), 2000.
- FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; ANDERSON, L. B. *Princípios das Operações Unitárias*, Guanabara Dois, Rio de Janeiro-RJ, p.436, 1982.
- GONZALES, P. E. M.; FILHO, L. L.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, L. M. M.; PARAISO, P. R., “*Evaporação da miscela: avaliação de parâmetros de processo*”, Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ, 3182 – 3190, 2010.
- JONGENELEN, H. P. J., Energy Conservation in Solvent Extraction Plants, *JAOCS Journal of the American Oil Chemists Society*, vol.53, p. 291-308, 1976.
- JORGE, L. M. 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*, 351-359, 2010.
- OILSEEDS – World Markets and Trade. Washington: USDA, Jan. 2012.
- PARAÍSO, P. R., *Modelagem e Análise do Processo de Obtenção do Óleo de Soja*, Unicamp, Campinas-SP (Tese de Doutorado), 2001.
- SANDLER, S. I., *Chemical Engineer Thermodynamics*, 2<sup>nd</sup> John Wiley and Sons, 2003.
- SANTANDER, C.M.G.; COSTA, ALINE C.; MACIEL FILHO, R. Pretreatment of sugarcane bagasse with phosphoric and sulfuric diluted acid for fermentable sugar production by enzymatic hydrolysis. *Chemical Engineering Transactions*, v. 20, p. 321-326, 2010.
- TEMA, *Standards of the tubular exchange manufactures association*, Enchanger Manufactures, 7. Ed., Nova York, 1998.
- ZANETTI, E. L. S. *Industrialização da Soja*. In: MIYASAKA, S. & MEDINA, C., ed. A Soja no Brasil. Campinas, ITAL, 1981.
- PRADO, E. R. A. *Modelagem e Simulação do Sistema de Evaporadores de Miscela de uma Destilaria de Óleo de Soja*, UEM, Maringá-PR (dissertação de mestrado), 2013.