

**PROJETO, SIMULAÇÃO E CONTROLE NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL,
ATRAVÉS DE REATORES CSTR E PFR**

¹ Jeniffer Dias Marques

¹ Mahely Cristina de Oliveira Maciel

² Prof. Dr. Mario Eusebio Torres

³ Prof. Me. Filipe Alves Coelho

Universidade São Francisco

e-mail: mahelymaciel@hotmail.com

¹ Aluna do Curso de Engenharia Química, Universidade São Francisco; Campus Swift

² Professor Orientador; ³ Professor Coorientador.

Resumo. Com a necessidade de não causar impactos elevados ao meio ambiente e diminuir a dependência por combustíveis fósseis, gerou-se grande interesse na utilização de biocombustíveis. O biodiesel é um biocombustível promissor, por apresentar vantagens ambientais em comparação com o diesel obtido do petróleo. Neste trabalho de graduação, foi estudada a simulação da transesterificação alcalina do óleo de soja no simulador Aspen Plus nos reatores contínuos, sendo esses o contínuo perfeitamente agitado (CSTR) e o de fluxo em pistão (PFR). Na realização dessa pesquisa, foi possível avaliar alguns parâmetros como: Temperatura, mostrando que superiores a 70°C os resultados são inviáveis; pressão, a qual se manteve constante durante todo o processo; e volume, sendo para a produção de biodiesel, o reator de fluxo pistonado apresentou um melhor desempenho.

Palavras-chave: Biodiesel. Simulação Aspen Plus. Reatores CSTR e PFR.

Introdução

Biodiesel é um combustível biodegradável proveniente de fontes renováveis, que pode ser obtido por diferentes processos, tais como a esterificação, transesterificação ou craqueamento, através de óleos vegetais (girassol, babaçu, mamona, soja, dentre outros), de animais ou de reaproveitamento, como os óleos e gorduras de frituras. O Brasil, por se situar em uma região tropical, apresenta enorme diversidade destas matérias-primas para produção de biodiesel.

Segundo a Agência Nacional do Petróleo – ANP (2015), a produção de biodiesel no Brasil utiliza como maior fonte de matéria-prima o óleo de soja com cerca de 82,43%, sendo a região sul a que apresenta não só a maior capacidade, mas também a maior produção desse biocombustível.

Em conformidade com o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES (2005), em todo o mundo é notável o crescente interesse por combustíveis produzidos através de fontes renováveis, isto ocorre devido há uma possível futura instabilidade no mercado do petróleo e principalmente pelo aquecimento global, proveniente do aumento do efeito estufa. Além disto, de acordo com Lima (2007), a produção do combustível renovável tem apresentado um potencial promissor no desenvolvimento social e tecnológico. O autor evidencia a geração de emprego ocasionada pela produção de biodiesel, bem como a valorização da mão de obra rural e do setor industrial.

O biodiesel apresenta vantagens em relação aos combustíveis não renováveis, por não ser tóxico, ter menor emissão de dióxido de carbono e entre outras vantagens (KETLOGETSWE e GANDURE, 2011).

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

O processo mais comum para produzir biodiesel é através de transesterificação, sendo a principal matéria-prima deste processo os óleos vegetais ou gorduras animais, resultando na mistura de ésteres (biodiesel) como produto e o glicerol como subproduto.

Com o avanço nas pesquisas, pode-se notar um grande potencial produtivo, sendo assim, há viabilidade na implantação de um processo industrial. Para isso, o auxílio de ferramentas computacionais é fundamental. A evolução de softwares capazes de estimar parâmetros industriais a partir de dados teóricos e de laboratórios, tem proporcionado grande economia. A diminuição do custo operacional, o aumento de escala, o menor tempo de implantação e a diminuição do uso de plantas piloto são consequências da utilização destes softwares (CARLSON, 1996).

A simulação computacional é uma das principais ferramentas utilizadas em pesquisas e na indústria. Com o objetivo de inovar ou implementar mudanças em uma planta industrial, utiliza-se softwares, com modelos matemáticos específicos, que tem a capacidade de vários tipos de simulação. Dentre eles, um dos mais utilizados é o Aspen Plus, considerado o líder no mercado da otimização de processos, pois oferece uma ampla gama de ferramentas no desenvolvimento de modelos e tem a capacidade de manipular processos sólidos, líquidos e gasosos. Através de modelos termodinâmicos e com o conhecimento da cinética da reação, é possível prever o comportamento de uma reação visando o produto obtido, o tamanho do reator e outras variáveis importantes (ASPENTECH).

Reatores químicos são projetados para conter reações químicas. Atualmente, é possível encontrar vários tipos de reatores e várias maneiras de classificá-los, contudo, existem dois tipos principais, dos quais são os reatores em tanques ou em tubos. Ambos os tipos podem ser usados como contínuos ou de batelada (LEVENSPIEL, 1972).

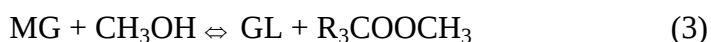
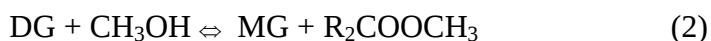
O reator perfeitamente agitado, também chamado de CSTR, possui um agitador para garantir a mistura adequada, fazendo que os reagentes e produtos tenham escoamento contínuo. É apenas empregue em reações de fase líquida e é usado extensivamente na indústria de processos químicos, tal como no processo de produção de biodiesel (LEVENSPIEL, 1972).

Levenspiel (1972) relata que o modelo de reator de fluxo em pistão, PFR, descreve as reações em sistema de fluxo contínuo, em que as variáveis principais do reator são as dimensões do mesmo. Existe um movimento constante ao longo do comprimento do reator e sendo também empregue no processo de produção de biodiesel.

O presente trabalho aborda o estudo da simulação de transesterificação do óleo de soja para obtenção de biodiesel, através dos reatores contínuos CSTR e PFR, visando à comparação e eficiência de ambos.

Metodologia

Segundo o trabalho de Nouredini e Zhu (1997), foi possível obter as reações de transesterificação que compõem a produção de biodiesel, tendo o glicerol como subproduto, representadas pelas seguintes reações.



Reação global:



TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

Transesterificação da trioleína (TG) com metanol, na presença de um catalisador alcalino, produz ésteres de ácidos graxos e glicerol (GL), sendo os componentes monoleína (MG) e dioleína (DG) os intermediários (NOUREDDINI e ZHU, 1997).

Simulação

Para o processo de simulação, utilizou-se o software Aspen Plus, pertencente ao grupo Aspen Technology. Este software é uma ferramenta para ser utilizado em simulações e dimensionamentos de plantas industriais voltadas para o processo químico. Com a aplicação do modelo termodinâmico correto, o Aspen tem por função utilizar métodos matemáticos que possibilitem prever o comportamento do processo (ASPENTECH).

Modelo termodinâmico

No presente trabalho, foi utilizado o modelo UNIFAC (Uniquac Functional – Group Activity Coeficiente). Escolha fundamentada através do estudo da tese de Silva F. (2015), que utiliza o modelo supracitado para o cálculo dos coeficientes de atividades dos componentes nas misturas e podendo assim, ser utilizado em diversos trabalhos da literatura, por apresentar uma característica mais completa.

Na Figura 1, verificam-se os componentes que compõe a produção do biodiesel e que foram inseridos no simulador Aspen Plus.

Figura 1 – Tela de inserção de componentes do Aspen Plus com todas as substâncias simuladas.

Component ID	Type	Component name	Alias
METHA-01	<i>Conventional</i>	METHANOL	CH4O
DIOLE-01	<i>Conventional</i>	DIOLEIN	C39H72O5
METHY-01	<i>Conventional</i>	METHYL-OLEATE	C19H36O2
TRIOLE-01	<i>Conventional</i>	TRIOLEIN	C57H104O6
MONOO-01	<i>Conventional</i>	MONOOLEIN	C21H40O4
GLYCE-01	<i>Conventional</i>	GLYCEROL	C3H8O3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Exercida a reação de transesterificação da trioleína com o metanol via catálise homogênea, sendo esses componentes inseridos na corrente de alimentação dos reatores CSTR e PFR. O triglicerídeo chamado de trioleína, de peso molecular de 885,432 g/mol foi escolhido como substituto ao óleo de soja, cujo peso molecular médio foi de 881,11 g/mol (SILVA, S.P. et al, 2009).

Cinética da reação

Conforme Nouredini e Zhu (1997), a reação de transesterificação do óleo de soja é realizada com metanol como reagente em excesso, encontrando assim os parâmetros cinéticos da reação. A Tabela 1 apresenta os valores cinéticos utilizados na simulação neste artigo e ajustado ao modelo cinético de Arrhenius, representado pela Equação 5 abaixo.

$$K = Ae^{-Ea/RT} \quad (5)$$

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

Tabela 1 – Parâmetros cinéticos da reação de transesterificação.

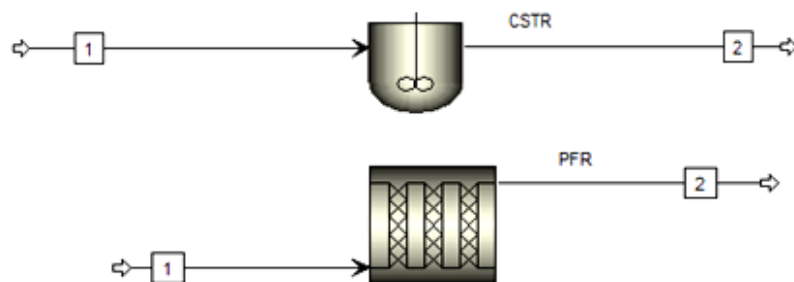
	Energia de Ativação (cal/mol)	Constante de taxa (L/mol min)
TG → DG	E1 = 13145	k1 = 0,050
DG → TG	E2 = 9932	k2 = 0,110
DG → MG	E3 = 19860	k3 = 0,215
MG → DG	E4 = 14639	k4 = 1,228
MG → GL	E5 = 6421	k5 = 0,242
GL → MG	E6 = 9588	k6 = 0,007

Fonte: Noureddini e Zhu (1997).

Modelagem dos fluxos dos reatores

Observa-se na Figura 2, a elaboração estacionária dos fluxos do processo de produção do biodiesel utilizando os reatores contínuos CSTR e PFR. Ambos os modelos estão disponíveis no software de simulação.

Figura 2 – Fluxos dos reatores CSTR e PFR



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as correntes de entrada, especificaram-se valores de temperatura, pressão e vazão de alimentação dos reagentes. Baseando-se, primeiramente, nos estudos realizados por Silva F. (2015) e em seguida adaptado aos dados calculados para essa pesquisa.

Dimensionamento do modelo

De acordo com Bunge, uma das principais empresas do agronegócio e alimentos do Brasil, há uma produção de cerca de 150 mil m³ de biodiesel ao ano. Com o conhecimento da produção anual, foi possível fazer a estimativa da vazão volumétrica do biodiesel, com valor de 15m³/h. Sendo assim, foram realizados os cálculos para cada reagente, representados na Tabela 2, com temperatura de entrada de 50°C. Encontraram-se as vazões molares dos reagentes, de acordo com a massa molar e a suas respectivas densidades.

Tabela 2 – Valores dos componentes.

Reagentes (kmol/h)	Valor de entrada
Metanol	147,25
Trioleína	15,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os valores apresentados na Tabela 2, obteve-se a vazão volumétrica.

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

Para o reator CSTR, o software Aspen Plus apenas possibilita a continuação da simulação quando ocorre a inclusão de um valor para volume. Validou-se a simulação aplicando as análises de sensibilidade para volume, seguindo para pressão e temperatura.

Para o reator PFR não há necessidade de inclusão do volume, contudo são indispensáveis as dimensões do mesmo. Baseando-se em vazões volumétricas já conhecidas, foi possível determinar o diâmetro do reator, através da Equação 6 seguinte (TELLES, 1999).

$$Q = v \times A \quad \therefore D^2 = \left\{ \frac{4 \times Q}{\pi \times v} \right\} \quad (6)$$

Sendo, D o diâmetro (m); Q a vazão volumétrica (m³/s); e, v a velocidade (m/s).

Conhecendo o diâmetro, foi possível calcular o comprimento do reator, uma vez estabelecido o equilíbrio na concentração de saída do reator.

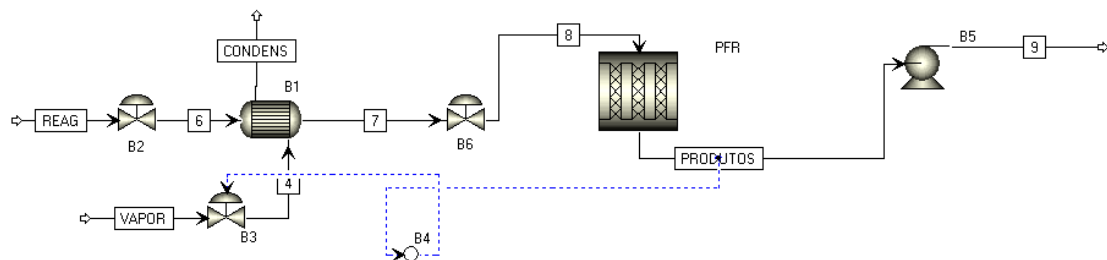
A fim de verificar a influência da pressão e temperatura na reação, foi realizada a análise de sensibilidade, variando ambas no reator PFR.

Simulação Dinâmica

O software Aspen Plus Dynamic, permite analisar o comportamento da reação através do tempo. Utilizou-se o mesmo para completa validação do reator que, ao decorrer das análises, apresentou características mais viáveis, dentro dos parâmetros estabelecidos.

Fez-se necessário a modificação da malha de controle do sistema, conforme representado na Figura 3, porquanto é indispensável à utilização de um trocador de calor no início do processo, pois havia a necessidade de estabelecer uma variável manipulada para o controle da temperatura do reator, usando um controlador proporcional integral derivativo (PID), que mantém a temperatura no *setpoint* desejado.

Figura 3 – Malha de controle no Aspen Plus Dynamic.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O controlador PID é uma técnica de processos que une as integrais, derivadas e proporcionais, fazendo que o erro possa ser minimizado. Diversas técnicas de sintonia são apresentadas por este controlador, podendo ser de processo em malha aberta (manual) ou malha fechada (automático). O ajuste do controlador apresenta papéis importantes como: ganho do processo; o tipo de processo; tempo morto; e, constante de tempo, atendendo condições estáveis e com perturbações minimizadas. Os elementos básicos que medem o desempenho da malha de controle são geralmente estabelecidos em função do regime transiente, mediante ao degrau do *setpoint* aplicado (FRANCHI, 2011).

Com a implementação do trocador de calor no processo, tornou-se necessária à aplicação do projeto de dimensionamento do mesmo. Conhecendo as variáveis do biodiesel, sendo essas, a vazão mássica com valor de 5,17 kg/s; o calor específico de 2002,9 J/kg.K; e,

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

com temperaturas de 29,494°C e 15,0038°C, calculou-se a taxa de transferência de calor através da Equação 7 abaixo (ZAITSAU e VEREVLIN, 2013).

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (7)$$

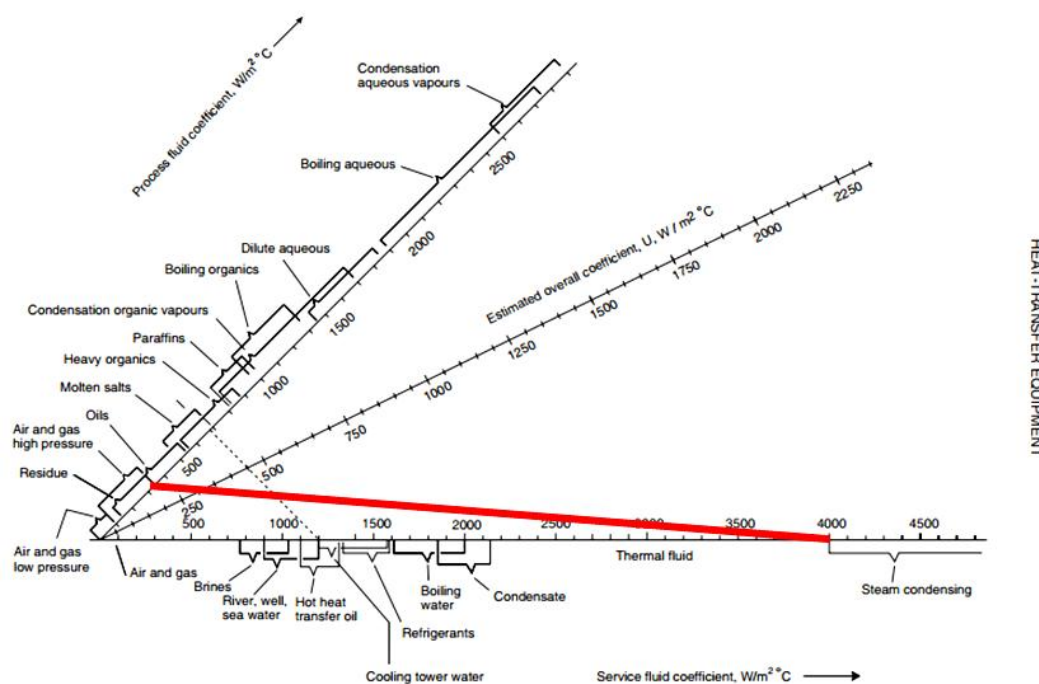
Obtendo-se a taxa, foi possível calcular a área do trocador de calor, representado pela Equação 8 abaixo (INCROPERA, 2008).

$$Q = UA \Delta T_{ml} \quad (8)$$

Onde, Q é a taxa de transferência de calor (W); A é a área de troca térmica (m²); U é o coeficiente global de transferência de calor (W/m² °C); e, ΔT_{ml} é a média logarítmica de temperatura (°C).

O valor reportado por U foi uma subestimativa, pois para este trabalho não foi necessário o projeto completo do trocador de calor. Para analisar o valor de U, foi preciso ligar uma reta do fluido de serviço, com o fluido de processo, conforme expresso na Figura 4 (COULSON e RICHARDSON, 2005).

Figura 4 – Valores representativos do coeficiente global de transferência de calor.



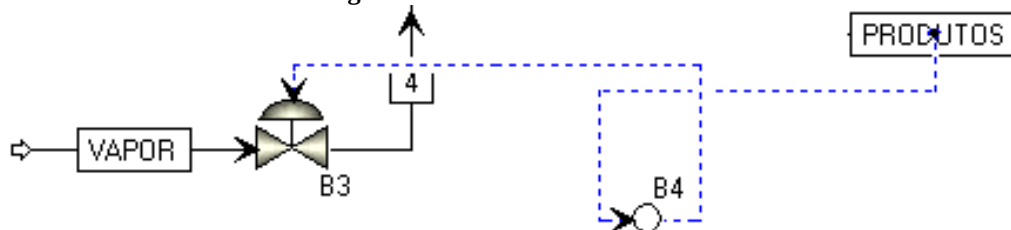
Fonte: Chemical Engineering, 2005.

As temperaturas dos fluidos, utilizadas no dimensionamento do trocador de calor como ΔT_{ml} , são representadas nas correntes de número 6, 7 e pela válvula de vapor (B3), da Figura 3.

A Figura 5 representa a divisão do processo em que se aplicou a análise para o controle da variável desejada. O item nomeado como B4, sendo esse o controlador PID, é o responsável pela modificação do controle de temperatura do reator, medido na corrente de saída. Um aspecto importante do controlador PID é sua sintonia, ou seja, a decisão sobre suas constantes.

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

Figura 5 – Malha de controle do PID.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Franchi (2011), são três os principais métodos de sintonia em malha aberta, sendo esses a Regra de Ziegler-Nichols, Regra de Cohen-Coon e sintonia por integrais de erro. Essas regras são baseadas na razão tempo morto/constante de tempo e servem para indicar o método mais adequado de sintonia, conforme as seguintes faixas:

- Regra de Ziegler-Nichols: $0,1 < (\Theta/\tau) < 0,3$;
- Regras de Cohen-Coon: $(\Theta/\tau) > 0,3$;
- Integral do erro $0 < (\Theta/\tau) < 1$.

Com a finalidade de determinar qual o método de sintonia para esse processo, plotou-se um gráfico para verificação do desempenho do controlador durante a simulação. O grau de desempenho deste controlador, é determinado a partir do percentual de ultrapassagem (U.P), apresentada pela Equação 9 a seguir.

$$U.P = \frac{a}{b} \times 100 \quad (9)$$

Sendo, a altura do pico em relação ao valor do *setpoint* e b o valor do *setpoint*.

Resultados e Discussões

Validação dos componentes do Biodiesel

A Tabela 3, apresenta os resultados dos componentes da reação para um volume de 2m^3 , no reator perfeitamente agitado, CSTR.

Tabela 3 – Conversão e vazão dos componentes de saída para o reator CSTR.

Componentes (kmol/h)	Entrada	Saída
Metanol	147,25	102,37
Trioleína	15,71	0,374
Biodiesel	-	44,870
Dioléina	-	0,43
Monoléina	-	0,27
Glicerol	-	14,63
Conversão		97,62%

Fonte: Elaborado pelo autor.

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

Com base dos estudos de Zhang, Rangaiah e Kariwala (2012) a conversão esperada é de 94,7%. Logo, o resultado simulado e expresso na Tabela 3, apresenta proximidade com o trabalho realizado pelos autores citados.

Para o reator PFR, considerando o cálculo da vazão volumétrica através da Equação 2, obtiveram-se os valores representados a seguir.

- $Q = 5,95 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s};$
- $v = 2 \text{ m/s};$
- $D = 0,06 \text{ m}.$

Para o reator tubular de 0,06 metros de diâmetro e 30 metros de comprimento, resultou-se em volume de $0,085\text{m}^3$. A Tabela 4 apresenta os resultados dos componentes obtidos na saída do reator.

Tabela 4 – Conversão e vazão dos componentes de saída para o reator PFR.

Componentes (kmol/h)	Entrada	Saída
Metanol	147,25	101,68
Trioleína	15,71	0,181
Biodiesel	-	45,56
Dioleína	-	0,335
Monoleína	-	0,348
Glicerol	-	14,84
Conversão		98,84%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados mostram que o reator PFR, com volume de apenas $0,085\text{m}^3$, apresentou um leve aumento da conversão e concentração do biodiesel, quando comparados ao modelo CSTR, o qual necessita de 2m^3 para equilíbrio dos valores. O reator PFR, produz resultados mais eficientes quando comparados a sua produção, levando em consideração que o mesmo tem 4,25% do volume do CSTR.

Analises de Sensibilidade

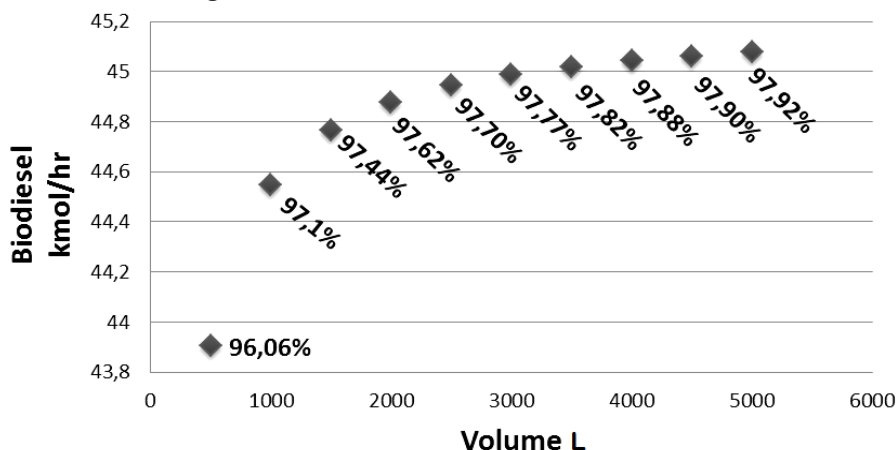
A análise de sensibilidade foi realizada a fim de verificar as influências de algumas variáveis, tais como o volume, temperatura e pressão nos reatores CSTR e PFR.

Variação de Volume - Reator CSTR

Para as vazões utilizadas e apresentadas anteriormente, o aumento do volume no reator CSTR não apresentou vantagens a partir de 2m^3 , porquanto, a diferença da rentabilidade do biodiesel para um volume de 5m^3 ou mais, é menos de 1%, ou seja, conforme os dados obtidos na Figura 6, pode-se verificar que não há vantagens econômicas em aumentar sua capacidade.

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

Figura 6 – Volume de biodiesel no reator CSTR.



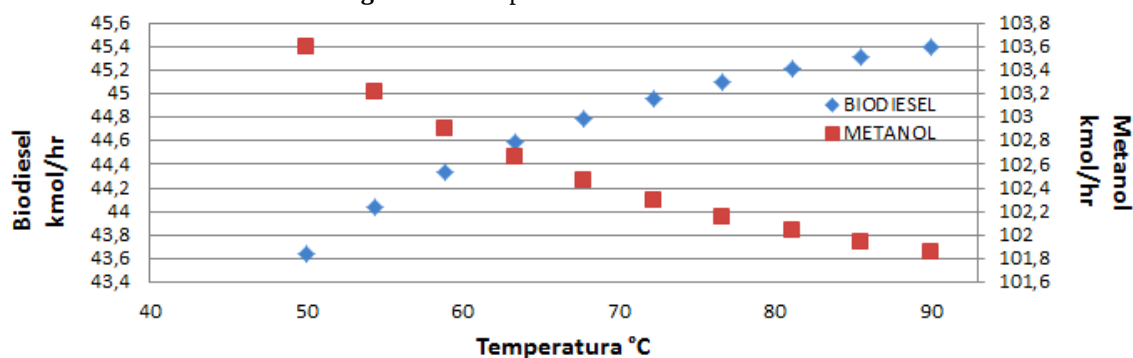
Fonte: Elaborado pelo autor.

Varição de Pressão e Temperatura - Reator CSTR

O componente metanol tem como característica o ponto de ebulição de 64,7°C.

Assim, foi realizado uma análise de sensibilidade no reator CSTR para as temperaturas expressas na Figura 7, a uma pressão fixa de 4 atm.

Figura 7 – Temperatura no reator CSTR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

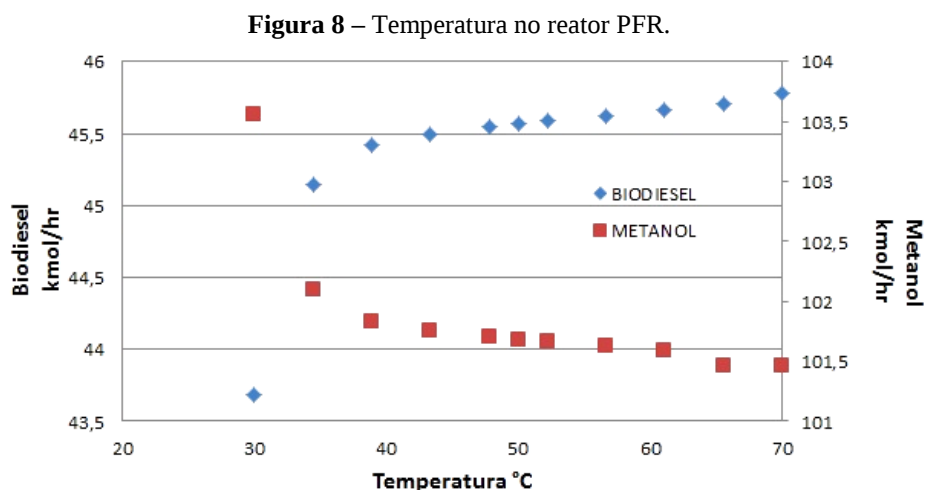
Na análise da Figura 7 foi possível identificar que, para o reator CSTR a variação da temperatura entre 50°C e 90°C, ocorre uma diminuição da vazão do metanol e aumento da vazão de biodiesel. Porquanto, ultrapassando a margem de 70°C, as temperaturas não apresentam resultados significativos quando comparados com a energia necessária para o aumento da mesma no reator, resultando assim num maior consumo elétrico. Neste caso, a temperatura adequada para a reação pode ser considerada entre 60° e 70°C.

Varição de Volume - Reator PFR

Para o reator PFR, o Aspen Plus não apresenta possibilidade da análise de sensibilidade de volume. Contudo, para avaliar o parâmetro mais viável, fixou-se um diâmetro de 0,06 metros e de acordo com a vazão, posteriormente, foi realizada a análise de sensibilidade para encontrar o melhor comprimento. O equilíbrio foi atingindo com o comprimento de 30 metros, resultando assim, no volume de 0,085m³.

Variação de Temperatura - Reator PFR

Através das análises de sensibilidade realizadas, foi observado que os componentes, biodiesel e metanol, têm um rendimento baixo em temperaturas que ultrapassam o ponto de ebulição do metanol. Com essa informação, foram realizadas as simulações envolvendo temperaturas entre 30°C e 70°C, onde foi avaliado que o reator PFR apresentou um melhor desempenho quando submetido a temperaturas entre 60°C e 70°C, conforme mostrado na Figura 8. De acordo com a pesquisa de Ramos (2011), isso ocorre devido a maior energia fornecida às moléculas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esses intervalos de temperatura foram definidos como apropriado, devido às propriedades dos reagentes. Para uma melhor homogeneização, é interessante que o metanol esteja o mais próximo do ponto de ebulição, isto aumenta o rendimento no sistema e diminui o tempo de residência no reator.

Variação de Pressão - Reator PFR

Realizou-se a análise de sensibilidade envolvendo diversas pressões no sistema, porém devido à teoria de equilíbrio, uma das características de processos que utilizam somente líquidos incompressíveis, o deslocamento do equilíbrio não é realizado com a pressão. Assim sendo, a conversão reacional permanece constante com diferentes pressões no meio reacional (BRUICE, 2006).

Certificando-se assim, que para qualquer pressão exercida no reator PFR o rendimento permaneceu constantes e sem alterações ao longo da simulação.

Comparação do desempenho entre os reatores CSTR e PFR

De acordo com os estudos das simulações realizadas nesse artigo, foi possível analisar que os reatores CSTR e PFR, apesar de muito utilizados na indústria de biodiesel, possuem resultados que diferem entre si.

O volume analisado com vazão de 15m³/h de biodiesel, para o reator CSTR, resultou-se em 2m³. Porém, para o reator PFR, é necessário um volume de apenas 0,085m³, equivalente a 4,25% do volume do CSTR.

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

Ambos os reatores apresentam os mesmos resultados quando submetidos à análise de sensibilidade de pressão em temperatura. A pressão sempre que alterada, responde com os mesmos resultados, sem alteração na taxa de conversão.

Para análise de temperatura, levando em consideração o ponto de ebulição do metanol, em ambos os reatores não se pode ultrapassar os 70°C, superior a essa margem, o processo se torna inviável.

Considerando as vazões de biodiesel desejadas ao dia, foi calculado o tempo de residência em cada reator, com a finalidade de identificar a diferença na produtividade nos mesmos. O reator CSTR apresentou o valor de 350 segundos, já para o reator PFR de 14,87 segundos.

De acordo com Pasa (2016), a transesterificação no reator PFR apresenta melhor desempenho para esse tipo de reação. Todavia, comprovando novamente a maior viabilidade do reator de fluxo pistonado.

Simulação no Aspen Plus Dynamic no reator de maior viabilidade

A realização da simulação no Aspen Plus Dynamic fez-se necessária apenas para o reator que apresentou maior viabilidade, sendo esse o PFR.

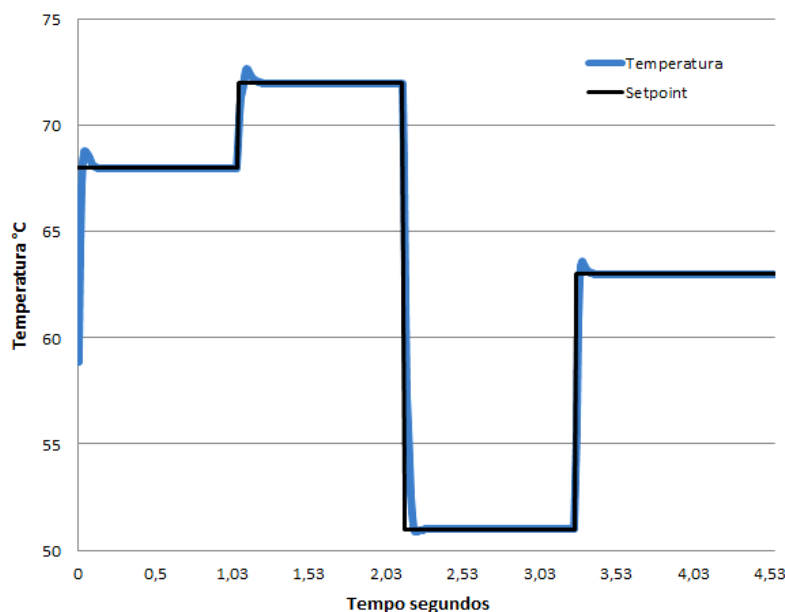
Para o projeto de dimensionamento do trocador de calor, aplicou-se a Equação 7 e Equação 8, que consequentemente, resultou nos valores representados pela relação abaixo.

- $A = 8,56 \text{ m}^2$;
- $U = 200 \text{ (W/m}^2 \text{ °C)}$;
- $\Delta T_{ml} = 87,57^\circ\text{C}$;
- $Q = 150 \text{ kW}$.

Para análise de qual método de sintonia o controlador se fixou, foi necessário realizar o cálculo de tempo morto por constante de tempo, a uma temperatura de 70°C. O valor de tempo morto foi de 0,7377 minutos, já o valor de constante de tempo foi de 3,225 minutos, sendo esses valores fornecidos pelo Aspen Dynamic, resultando-se assim em $\Theta/\tau = 0,228$. Com esse valor, verificou-se que o método está dentro dos parâmetros da Regra de Ziegler-Nichols.

Alternando o *setpoint*, dentre as mediações de 70°C até 40°C, pode-se observar no gráfico plotado pelo próprio simulador, que o sistema de controle apresenta uma característica de 1º ordem, isso se deve a súbita mudança da variável, no qual acarreta em degraus de acordo com a alteração manual da temperatura, até sua estabilização, conforme é exibido na Figura 9.

Figura 9 – Variações na alteração da temperatura no simulador Dinâmico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os resultados adquiridos na Figura 9, calculou-se o percentual de ultrapassagem do *setpoint* empregando a Equação 9, o qual apresentou o resultado de 1,1%, ou seja, na média. Quando o *setpoint* é alterado, a temperatura ultrapassa apenas 1,1% do valor do novo *setpoint*.

$$U.P = \frac{a}{b} \times 100 = \frac{0,8}{72} \times 100 = 1,1\%$$

Conclusão

Os valores obtidos mostraram que o reator PFR apresenta um melhor desempenho no processo de produção do biodiesel. O estudo realizado para volume mostrou que o mesmo reator, resultou em uma conversão 1,22% a mais de biodiesel e precisamente utilizando quantidades de 4,25% de volume do reator CSTR. Para o parâmetro de temperatura, foram obtidos resultados semelhantes para ambos, não podendo ultrapassar os 70°C. As análises referentes à pressão evidenciaram que a mesma não influencia os resultados de transesterificação, devido à natureza do estado físico dos componentes, sendo os reagentes e produtos. Com a simulação no Aspen Plus Dynamic, pode-se comprovar a eficiência do controlador PID, pois, quando aplicado a uma simulação onde o efeito do tempo justifica a realidade do processo, torna-se assim, mais preciso os resultados obtidos no reator PFR. Com a intenção de uma eventual continuidade desse trabalho de graduação, sugere-se em um futuro, a realização de comparação entre os reatores PFR, CSTR e do Batch (batelada), com acréscimo do sistema de refluxo de metanol ao final de cada sistema.

Agradecimentos

Primeiramente agradecemos a Deus por ter nos dado saúde e força para superar as dificuldades. Aos nossos pais, pelo amor, incentivo e incondicional apoio. Ao nosso orientador Mario Eusebio Torres Alvares e coorientador Filipe Alves Coelho, pelo total suporte. À Universidade São Francisco de Campinas e a todos aqueles que direta ou

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado. Adicionalmente, agradecemos ao Professor Rubens Maciel Filho, do laboratório de LOPCA – FEQ, da Universidade Estadual de Campinas, por ter cedido o simulação Aspen Plus, que com seu apoio tornou-se possível à realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

Agência Nacional do Petróleo. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/wwwanp/> >. Acesso em: 10 junho 2017.

ASPENTECH. Aspen Plus. Disponível em: < <http://home.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus> >. Acesso em: 03 outubro 2017.

BRUICE, P. Y. “**Hidrocarbonetos, estereoquímica e ressonância.**” In: PEARSON (Ed.). Qui. Org. São Paulo, 2006. Cap. 3, p 112-139.

Bunge. Disponível em: < <http://www.bunge.com.br/imprensa/noticia.aspx?id=476> >. Acesso em: 19 set. 2017.

CARLSON, E. C. “**Don’t Gamble With Physical Properties For Simulations.**” Chem.l Eng. Prog., p, 35 – 14, 1996.

COSTA, Ricardo Cunha da; PRATES, Cláudia Pimentel T.. **O PAPEL DAS FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA NO DESENVOLVIMENTO DO SETOR ENERGÉTICO E BARREIRAS À SUA PENETRAÇÃO NO MERCADO.** Brasília: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior - BNDES, 2005.

FRANCHI, Claiton Moro. **Controle de Processos Industriais.** São Paulo: Érica, 2011.

GUT, Jorge Andrey Wilhelms. **Configurações ótimas para trocadores de calor.** 2003. 268 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Usp, São Paulo, 2003.

INCROPERA, Frank P.. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.** Rio de Janeiro: Ltc, 2008.

J. M. COULSON; J. F. RICHARDSON. **Chemical Engineering.** Fourth Edition Vol. 6. Oxford: R. K. Sinnott, 2005.

KETLOGETSWE, Clever; GANDURE, Jerekias. Blending Cooking Oil Biodiesel with Petroleum Diesel: A Comparative Performance Test on a Variable IC Engine. “**Smart Grid And Renewable Energy**” [s.l.], v. 02, n. 02, p.165-168, 2011. Scientific Research Publishing, Inc., <http://dx.doi.org/10.4236/sgre.2011.22019>

LEVENSPIEL, O., “**Engenharia das Reações Químicas**”, Vols. 1 e 2 , Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1972.

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

LIMA, José Renato de Oliveira et al. “**Biodiesel de babaçu**” (Orbignya sp.) obtido por via etanólica. Química Nova, São Paulo, v. 30, n. 3, p.600-603, jun. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422007000300019>.

NOUREDDINI, N., ZHU, D. “**Kinetics of transesterification of soybean oil**”. Journal of American Oil Chemists’ Society, 74, 1457–1463, 1997.

PASA, M.A. “**SIMULAÇÃO DO PROCESSO CONTÍNUO DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL.**” 2016. 8 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade de Caxias do Sul, Centro de Ciências Exatas e da Tecnologia, Curso de Engenharia Química, Caxias do Sul, 2016.

RAMOS, L. P. *et al.* Tecnologias de Produção de biodiesel. *Virt. Quí.*, v. 3, n. 5, p 385-405, 22 out. 2011.

SILVA, Bruno Firmino da. “**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE PLANTWIDE APLICADOS NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL**” 2015. 87 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Unicamp, Campinas, 2015.

SILVA, S. P. “**Influência da temperatura na fabricação de biodiesel.**” 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, Fortaleza, 2009.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. “**Tubulações Industriais.**” Rio de Janeiro: Ltc, 2001. 178 p.

ZAITSAU, Dzmitry H.; Sergey P. Verevkin. Thermodynamics of biodiesel: combustion experiments in the standard conditions and adjusting of calorific values for the practically relevant range (273 to 373) K and (1 to 200) bar. **Journal of the Brazilian Chemical Society**. Alemanha, p. 4-5. Outubro, 2013.

ZHANG, C.; RANGAIAH, G.P.; KARIWALA, V. Plantwide Control: Recent Developments and Applications. Cap. 14: Design and Plantwide Control of a Biodiesel Plant, p. 280, 2012.